INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

UNA NUEVA ERA PARA EL ALZHÉIMER | BIOLOGÍA DEL NUEVO CORONAVIRUS | AGUJEROS BLANCOS

N.º 526



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Julio 2020 • N.º 526 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

INFORME ESPECIAL

EL FUTURO DE LA MEDICINA

UNA NUEVA ERA PARA EL ALZHÉIMER

Los últimos hallazgos obligan a repensar las causas y los tratamientos de la enfermedad

COVID-19
Biología del nuevo coronavirus

TECNOLOGÍA
¿Podemos confiar en la inteligencia artificial?

FÍSICA TEÓRICA
En busca de agujeros blancos

00526

9 770210 136004



ARTÍCULOS

INFORME ESPECIAL
EL FUTURO DE LA MEDICINA

18 UNA NUEVA ERA PARA EL ALZHÉIMER
Repensar sus causas y posibles curas.

20 Las bases neurobiológicas del alzhéimer
Ante nuestra incapacidad para hallar un tratamiento eficaz, ha llegado la hora de reexaminar la biología básica de esta enfermedad. Los avances en cinco áreas fundamentales despiertan nuevas esperanzas.
Por Kenneth S. Kosik

24 El conflicto de los fármacos antiamiloideos
Una de las piedras angulares del tratamiento contra el alzhéimer comienza a resquebrajarse.
Por Tanya Lewis

27 El nexo entre la menopausia y el alzhéimer
Envejecer es el principal factor de riesgo de padecer la enfermedad. Todo indica que, por un estrecho margen, ser mujer es el segundo. ¿Por qué?
Por Jena Pincott

33 La influencia de la polución en la demencia
Las partículas que expulsan al aire los tubos de escape y otras fuentes contaminantes se vinculan ahora con el alzhéimer. Estudios recientes demuestran que pueden llegar hasta el cerebro desde la nariz y los pulmones. *Por Ellen Ruppel Shell*

BIOLOGÍA
44 Dentro del nuevo coronavirus
Las interioridades del patógeno que ha infectado el mundo. *Por Mark Fischetti*

TECNOLOGÍA
50 El traje nuevo de la inteligencia artificial
Cada vez más decisiones de calado se están dejando en manos de supuestas máquinas inteligentes que no comprenden absolutamente nada. Por el bien de todos, urge una revisión crítica de los logros de este campo de investigación. *Por Ramon López de Mántaras*

FÍSICA TEÓRICA
60 En busca de agujeros blancos
Los agujeros blancos, hipotéticos astros que expulsarían materia sin absorberla jamás, podrían ser el destino último de los agujeros negros. Su detección abriría una ventana a la gravedad cuántica. *Por Carlo Rovelli*

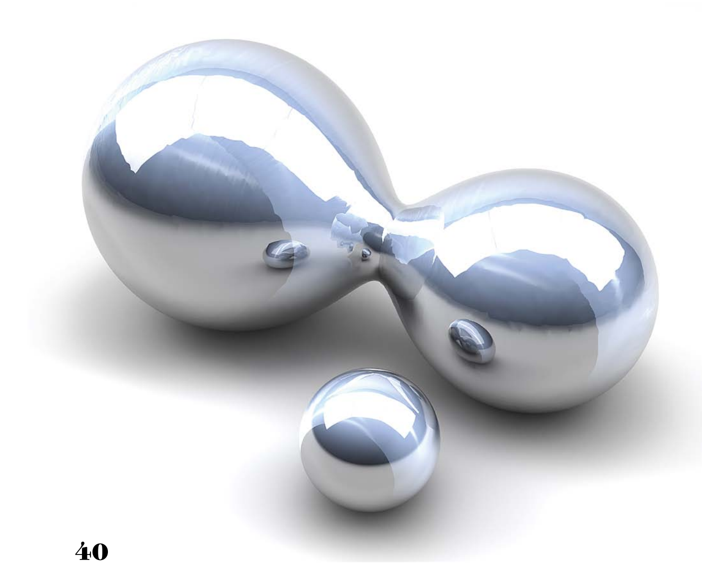
GEOLOGÍA
70 Reinterpretar un volcán
Una nueva concepción del descomunal macizo Tamu obliga a revisar nuestras ideas sobre la formación del fondo oceánico. *Por William W. Sager*

FÍSICA CUÁNTICA
76 Retrofuturismo cuántico
Igual que la ficción *steampunk* combina el estilo victoriano con tecnología futurista, una nueva rama de la física actualiza la termodinámica del siglo xix para aplicarla a los sistemas cuánticos modernos.
Por Nicole Yunger Halpern

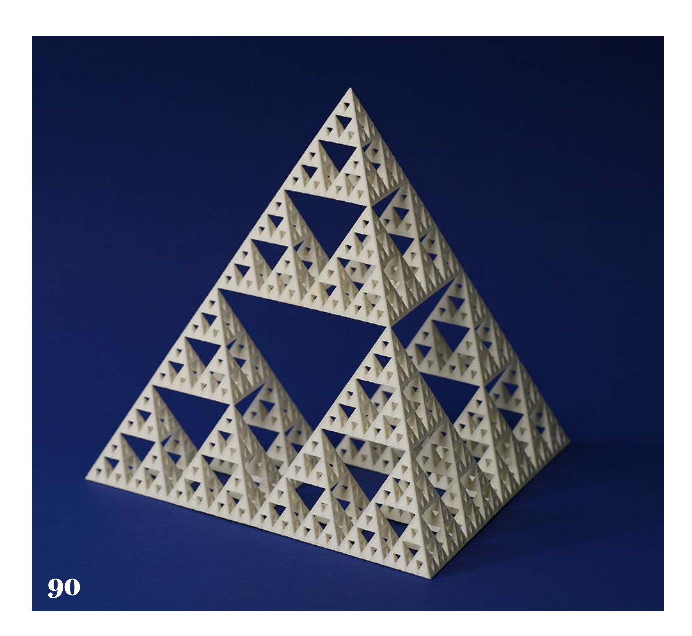
GETTY IMAGES/GREMLIN/ISTOCK



11



40



90

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes
Sensores que siguen nuestros pasos. Partículas antitóxicas. Metal bactericida. Un pez campeón del dopaje sanguíneo. Poner freno a la extinción. El parásito de la malaria, una mezcla de cepas. Los falsos positivos en la COVID-19. Fecundidad perpetua.

11 Agenda

12 Panorama
Los resultados anómalos se acumulan en el LHC. *Por Charlie Wood*
¿Cómo se han reducido las emisiones de carbono por la pandemia de COVID-19? *Por Jeff Tollefson*

38 De cerca
Micromamíferos de las montañas tropicales de Borneo. *Por Jennifer A. Leonard*

40 Filosofía de la ciencia
Cómo trascender la vida natural. *Por Jon Umerez*

42 Foro científico
Necesitamos una ciencia de la noche. *Por Michele Acuto*

82 Taller y laboratorio
El láser ultravioleta de nitrógeno (I). *Por Marc Boada Ferrer*

86 Correspondencias
El camino hacia la electrodinámica de Maxwell. *Por José Manuel Sánchez Ron*

90 Juegos matemáticos
La isla de Koch, los fractales keplerianos y el tétrix. *Por Bartolo Luque*

93 Libros
Nacidos para contar. *Por Antoni Hernández-Fernández*
Mecánica cuántica sin misterios. *Por Miguel Á. Vázquez-Mozo*

96 Hace...
50, 100 y 150 años.

EN PORTADA



Tras los intentos fallidos recientes por desarrollar un tratamiento eficaz contra el alzhéimer, numerosos científicos están reexaminando ahora las causas de la enfermedad. Entre las nuevas líneas de investigación figuran el origen de las proteínas anómalas y la alteración de las señales nerviosas, el sorprendente papel de la contaminación atmosférica y los factores que llevan a un mayor riesgo en las mujeres. Ilustración de Galen Dara.

redaccion@investigacionyciencia.es



Mayo 2020

PANDEMIAS Y MODELOS

En el excelente artículo «Cómo modelizar una pandemia», de Bartolo Luque, Fernando Ballesteros y Octavio Miramontes [Investigación y Ciencia, mayo de 2020], se muestra una gráfica de la evolución de la gripe de 1918 en la ciudad estadounidense de San Luis. En ella se observa que, tras relajar las medidas iniciales de confinamiento, se produjo un segundo brote más mortífero que el inicial.

Estos días he oído a varios expertos comentar la posibilidad de que algo parecido pueda ocurrir con la pandemia de COVID-19: que un desconfinamiento precipitado traiga consigo una segunda oleada epidémica peor que la primera.

Sin embargo, tras una primera oleada hay siempre un mayor número de personas inmunizadas y, por tanto, menos población para infectar. ¿Cómo es posible entonces que un segundo pico infeccioso pueda ser peor que el primero?

Juan Carlos Gil Méndez
Gijón, Asturias

El modelo SIR divide a la población en tres grupos: vulnerables (S), infectados (I) y recuperados (R), y solo considera trasvases de población entre los grupos $S \to I \to R$, ya que se supone que las personas que han superado la enfermedad quedan inmunizadas y no pueden volver a infectarse.

Sin embargo, tal y como se comenta en el artículo de Stacey McKenna «¿Qué es en realidad la inmunidad a la COVID-19?» [www.investigacionyciencia.es, 17 de abril de 2020], una pregunta abierta en el caso de la COVID-19 es hasta qué punto (o durante cuánto tiempo) los individuos que ya han pasado la infección quedan realmente inmunizados, ya que se teme que algunos puedan volver a contraer la enfermedad.

Esto último implicaría la existencia de trasvases de población en la dirección $R \to S$, no contemplados por el modelo SIR. ¿En qué medida incorporan los modelos epidemiológicos actuales esa posibilidad? ¿Cuáles serían los principales cambios en la evolución de una epidemia con respecto a las predicciones del modelo SIR clásico?

Laia Queralt
Barcelona

> «Tras una primera oleada hay siempre un mayor número de personas inmunizadas. ¿Cómo es posible que un segundo pico infeccioso pueda ser peor que el primero?»
> *—Juan Carlos Gil (Gijón)*

Responden los autores: *Sobre la pregunta de Gil Méndez, el 13 de mayo se estimó, a partir de estudios serológicos, que en España solo un 5 por ciento de la población había estado en contacto con el virus. Los resultados fueron semejantes para otros países europeos. Puesto que dicho porcentaje se encuentra muy alejado del necesario para conseguir la inmunidad de grupo, un segundo brote, sin medidas de contención, se comportaría prácticamente como si la epidemia empezara de cero, por lo que podrá ser mejor, igual o peor que el primero. Todo esto sin tener en cuenta que, en el caso de la COVID-19, desconocemos todavía hasta qué punto y durante cuánto tiempo —si es el caso— los individuos que ya han pasado la infección quedan inmunizados.*

En cuanto a la pregunta de Queralt, es cierto que, tal y como apunta McKenna en su artículo, «se desconoce en qué parte del espectro de la inmunidad se sitúa la COVID-19». Por tanto, y al menos en principio, es posible la existencia de trasvases de población en la dirección $R \to S$, si bien a la luz de los datos disponibles, este trasvase, en caso de existir, es por ahora irrelevante.

El modelo SIR es el modelo más elemental en epidemiología matemática. En nuestro artículo decidimos centrarnos en él por su generalidad y claridad didáctica. No obstante, existe una enorme variedad de modelos compartimentales que tienen en cuenta variantes como las que apunta la lectora. Algunos ejemplos son el modelo SIS, donde la inmunidad tiene fecha de caducidad, como ocurre con los catarros comunes; el modelo SEIR, donde se tiene en cuenta que los individuos presentan periodos de incubación durante los que no son infecciosos (la E indica «expuesto»); o su variante SEIS, que no contempla inmunidad, etcétera.

Todas las variantes tienen sus peculiaridades, las cuales se ajustan a las características de la epidemia que se desea modelizar, y como consecuencia las curvas de evolución epidémica pueden ser muy diferentes. Por ejemplo, el modelo SIS describe, para el número de infectados en el tiempo, una curva logística («con forma de S») en la que no aparece el famoso pico del que tanto hemos oído hablar durante estos meses.

Erratum corrige

En el artículo **Náufragos en la roca: plantas de los suelos de yeso** [por Juan F. Mota, M. Encarna Merlo y Francisco J. Pérez García; Investigación y Ciencia, junio de 2020], en el epígrafe de la gráfica inferior de la página 47 debe sustituirse *rojo* por *verde y azul* por *naranja*.

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes



La manera de andar de cada persona es única, y un nuevo sensor compacto puede monitorizar muchas a la vez.

GETTY IMAGES

TECNOLOGÍA

Sensores que siguen nuestros pasos

Captan a distancia el modo de andar de las personas para identificarlas y vigilar su salud

Las huellas dactilares no son los únicos rasgos biométricos que nos distinguen. La forma de andar de cada persona es única y puede servir no solo para identificarla, sino también como un indicador de su estado de ánimo y su salud. Un equipo de investigadores ha desarrollado sensores remotos que analizan los pasos midiendo las pequeñas vibraciones del suelo, y los ha empleado para reconocer a individuos concretos que caminaban por un edificio y para ensayar un nuevo método de control del bienestar a distancia.

La marcha constituye «una característica muy distintiva», afirma Hae Young Noh, ingeniera civil y ambiental que inició esta investigación en la Universidad Carnegie Mellon y luego se trasladó a Stanford. Puede revelar «quién eres, dónde estás, qué estás haciendo o incluso tu estado cognitivo». Si los sensores detectan un tipo de pisada, el *software* puede analizarlo para verificar la identidad del individuo. Los sistemas anteriores alcanzaban una precisión del 95 por ciento, apunta el ingeniero eléctrico y científico computacional Vir Phoha, de la Universidad de Siracusa, que no participó en el nuevo estudio.

Y los tipos de marcha aportan más que una identificación, prosigue Phoha: «Se puede aprender mucho a partir de la forma de andar de una persona; en particular, información sobre su salud». Por ejemplo, si alguien empieza a cargar más peso en un lado, podría sufrir un

problema neurológico. Esos datos ayudarían a los médicos a supervisar a los mayores y a otra población de riesgo que quiere vivir de manera independiente: seguir la marcha de los sujetos permitiría controlar su salud sin invadir directamente su espacio.

Hasta ahora, para obtener información sobre el paso, había que equipar a los sujetos con dispositivos ponibles, o hacerles caminar sobre alfombras especiales o suelos modificados. Pero Noh, junto al ingeniero informático y eléctrico Pei Zhang y otros colegas de la Universidad Carnegie Mellon, quería desarrollar sensores portátiles de pisadas y que funcionaran a distancia. Los científicos aprovecharon que los suelos y paredes habituales recogen las vibraciones (incluso las leves) que genera la actividad desarrollada en el espacio que encierran. «Usamos grandes estructuras físicas, como edificios o puentes, a modo de sensores para monitorizar de manera indirecta a las personas y sus entornos», explica Noh.

Para captar las vibraciones que produce una simple pisada hacen falta detectores sumamente sensibles. «Si alguien se sienta en una silla a un metro de nosotros y ponemos uno de estos sensores en el suelo, podemos percibir los latidos de su corazón», ilustra Zhang. Cada sensor, un dispositivo cilíndrico de unos pocos centímetros de altura, se coloca sobre el suelo y es capaz de registrar la marcha de una persona a distancias de hasta 20 metros, asegura Noh. Los investigadores pueden distribuir un conjunto de sensores en el área donde pretenden detectar los pasos.

El grupo tuvo que «enseñar» al nuevo sistema a distinguir esas señales del ruido de fondo presente en cualquier edificio concurrido. «Combatir el ruido es nuestro mayor reto», admite Noh, y hubo que abordarlo tanto a nivel de *hardware* como de *software*. En lo referente a los componentes físicos, cada sensor posee un amplificador que ajusta su comportamiento de manera automática: cuando las vibraciones producidas por las pisadas parecen venir de lejos, las aumenta; pero conforme la señal se hace más fuerte y amenaza con saturar el dispositivo, el amplificador reduce su sensibilidad.

Una vez que los sensores han captado un paso, el *software* toma el relevo. «Aplicamos diversas técnicas de procesamiento de señales y de aprendizaje automático para distinguir la señal asociada a una persona de otros ruidos que no nos interesan», comenta Noh. Al igual que los datos obtenidos mediante otros métodos de detección de pasos (como los dispositivos ponibles o las alfombras con sensores de presión), los tipos de marcha medidos con el nuevo sistema pueden servir para identificar a una persona y algunos posibles problemas de salud. El equipo ha presentado su trabajo en diversas reuniones científicas, como la reciente Conferencia Internacional de Análisis Modal, organizada en febrero por la Sociedad de Mecánica Experimental.

El sistema muestra la actividad de los transeúntes en directo en la pantalla de un ordenador, lo que recuerda al «Mapa del merodeador», un plano mágico que revela la posición de cada persona en los libros y películas de Harry Potter. Sin embargo, ese mapa ficticio refleja una sola localización, mientras que los nuevos sensores de pasos podrían usarse en cualquier edificio, subraya Eve Schooler, ingeniera principal y directora de redes emergentes de la Internet de las cosas en Intel.

Schooler, que no participó en el proyecto pero ha colaborado en otras ocasiones con los investigadores, destaca que «lo más interesante es que, gracias a algunos de los algoritmos que han desarrollado, los resultados son transferibles. No hace falta repetir la calibración para reconocer la marcha de una persona en otro edificio: disponen de técnicas que se encargan de ello». Una vez que el sistema experimental «aprende» cómo anda

BIOTECNOLOGÍA

Partículas antitóxicas

Las nanopartículas no esféricas «disfrazadas» de glóbulos rojos absorben toxinas de forma eficaz

Los glóbulos rojos son los vehículos que transportan el oxígeno en nuestro organismo, pero hay sustancias nocivas que, en caso de entrar en el torrente sanguíneo, pueden destruirlos. Un grupo de científicos de la Universidad Johns Hopkins ha investigado cómo evitarlo usando nanopartículas sintéticas biomiméticas (inspiradas en la naturaleza) que se hacen pasar por glóbulos rojos. En un estudio con ratones, hallaron que conferir a estas «impostoras» una forma no esférica antes de disfrazarlas mejora los resultados.

Algunos trabajos anteriores habían mostrado que las nanopartículas sintéticas recubiertas con membranas celulares de glóbulos rojos actúan como esponjas limpiadoras. «Al inyectar una gran cantidad de esas partículas en la sangre, creamos señuelos que absorben las toxinas y reducen el daño a las células sanas», explica Jordan Green, ingeniero biomédico de la Universidad Johns Hopkins y autor principal del estudio, publicado en abril en *Science Advances*.

Los investigadores fabricaron nanopartículas esféricas a partir de un polímero biodegradable que es seguro y se emplea de manera habitual en dispositivos terapéuticos. Luego las estiraron hasta darles formas parecidas a discos aplanados y balones ovalados. Por último, recubrieron algunas partículas de cada tipo con membranas de glóbulos rojos procedentes de ratones.



THOMAS FUCHS

El equipo suponía que las nanopartículas con forma de disco (similar a la de los glóbulos rojos) absorberían mejor las toxinas, debido a su mayor superficie. Para determinar qué forma era más eficaz, inyectaron cada variedad en ratones que habían sido expuestos a una dosis letal de una toxina de la bacteria *Staphylococcus aureus*. Según Green y sus colaboradores, las partículas ovaladas recubiertas de membrana fueron las que subsistieron más tiempo antes de que las eliminara el sistema inmunitario: casi siete veces más que las esferas sin envoltura. Los ratones tratados con partículas esféricas (incluso las

un individuo, el conjunto de sensores será capaz de identificarlo en la oficina o en casa.

Dado lo asequibles que son los dispositivos (Noh calcula que producir cada uno costaría entre 10 y 20 dólares) y que solo hace falta colocarlos cada 20 metros para crear la imagen de una planta entera de un edificio, parece posible emplearlos en ámbitos muy diversos, como propone Schooler.

Un seguimiento así plantea evidentes problemas de privacidad, y los investigadores sugieren que sus sensores solo deberían usarse en aplicaciones sanitarias consensuadas. Estos sistemas de vigilancia, señalan, ayudarían a los cuidadores a detectar cuándo corren peligro de caerse las personas mayores. También podrían alertar de manera precoz a los hospitales infantiles sobre síntomas de enfermedades crónicas, como la distrofia muscular. Los desarrolladores sostienen que, en esos casos, los sensores de pisadas protegerían la privacidad mejor que una cámara.

«De hecho, este sistema surgió a raíz de los problemas de privacidad que presentan otros mecanismos de seguimiento», incide Zhang. Y en materia de salud, concluye, «estoy dispuesto a ceder una pequeña parte de mis datos con tal de prevenir caídas y detectar enfermedades». —*Sophie Bushwick*

revestidas) no vivieron mucho más que los del grupo de control. Pero una tercera parte de los roedores que recibieron partículas recubiertas con forma de disco y la mitad de los que recibieron aquellas con forma de balón seguían vivos y sanos una semana después.

Green confirma que, aunque la forma de disco se acerca más a la de un glóbulo rojo real, las partículas ovaladas funcionaron mejor. «Eso indica que hay otros aspectos que la forma de disco no logra imitar, como la elasticidad de los glóbulos rojos, que se deforman mientras circulan», afirma. Según el investigador, lo más probable es que las partículas ovaladas se muevan por la sangre con mayor facilidad.

Otros estudios «habían mostrado que las formas no esféricas y los revestimientos biomiméticos a base de membranas podían, por separado, prolongar la vida útil de las partículas sintéticas en el torrente sanguíneo», apunta Dyche Mullins, farmacólogo celular y molecular de la Universidad de California en San Francisco que no participó en la investigación. Sin embargo, «este trabajo revela una sinergia entre ambos efectos».

—*Harini Barath*



UNIVERSIDAD PURDUE/ERIN EASTERLING

Al tratar el cobre o el titanio con láser (*parte derecha de los trozos*) el agua se extiende mucho más sobre ellos. Eso facilita que el metal entre en contacto con cualquier microbio contenido en el líquido y lo elimine.

CIENCIA DE MATERIALES

Metal bactericida

Tratar el cobre con láser multiplica sus propiedades antimicrobianas

Las superficies de cobre destruyen los microbios que entran en contacto con ellas en cuestión de horas, y un estudio reciente muestra que irradiar este metal con láser hace que sea aún más mortífero.

Las bacterias «se están volviendo más agresivas y resistentes a los fármacos, y lo mismo ocurre con los virus», señala Rahim Rahimi, ingeniero de materiales de la Universidad Purdue y autor principal de un artículo sobre la nueva técnica, publicado en abril en *Advanced Materials Interfaces*. «Existe un gran interés por crear superficies que supriman estos patógenos nada más entrar en contacto con ellos», prosigue Rahimi, puesto que eso «impediría que se propagasen en el ambiente». Cabe aclarar que el nuevo trabajo se centró en las bacterias.

El cobre es un buen candidato para obtener tales superficies: el ser humano lleva aprovechando sus propiedades bactericidas desde hace al menos 8000 años. Así, algunas civilizaciones de la Edad de Bronce almacenaban el agua que bebían en recipientes de cobre para prevenir enfermedades, afirma Michael Schmidt, microbiólogo de la Universidad Médica de Carolina del Sur que no participó en la investigación. La capacidad de destruir gérmenes del cobre, explica Schmidt, proviene de su conductividad eléctrica. Cuando un microbio toca una superficie metálica, el material captura electrones de la membrana celular. Eso desencadena una reacción química que acaba abriendo los poros del organismo y lo destruye.

A fin de mejorar el proceso, el equipo de Rahimi irradió una muestra de cobre con luz láser durante unos milisegundos, lo cual creó nanoporos en el metal liso e incrementó su superficie. «Básicamente, han cogido una pradera y la han convertido en Manhattan», describe Schmidt. Las estructuras verticales generadas «aumentaron el área disponible para destruir microbios», añade. La superficie irregular también provocó que el cobre se adhiriese con más fuerza al agua y, por lo tanto, a cualquier bacteria contenida en ella.

Los investigadores pusieron a prueba este método depositando muestras de distintas bacterias (entre ellas, *Escherichia coli* y una cepa de *Staphylococcus aureus* resistente a antibióticos) sobre piezas de cobre, tanto lisas como tratadas con láser. En cuanto las células tocaron el metal con relieve, sus membranas empezaron a sufrir daños. La superficie irradiada eliminó las bacterias por completo, en algunos casos mucho más deprisa que el metal inalterado: mató algunos microbios al instante, y tardó entre 40 minutos y dos horas en acabar con una colonia entera, dependiendo de la especie y la concentración.

Rahimi sostiene que el tratamiento con láser también podría funcionar con otros metales como el titanio, muy usado en implantes quirúrgicos. Y señala que todos los metales poseen ciertas propiedades antimicrobianas, aunque el titanio, que presenta una baja conductividad eléctrica, tarda mucho más en destruir los gérmenes que los buenos conductores como el cobre. Aplicar la técnica del láser, concluye Rahimi, «podría potenciar la acción antimicrobiana del metal en cuestión».

—*Sophie Bushwick*

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Un pez campeón del dopaje sanguíneo

Una especie antártica varía drásticamente la concentración de glóbulos rojos en función de su actividad en el agua

La autotransfusión de sangre con el fin de mejorar el rendimiento físico es una práctica prohibida en el deporte profesional. Los atletas recurren a esta argucia para suministrar a la musculatura más hematíes, o glóbulos rojos, los corpúsculos sanguíneos encargados del transporte de oxígeno. Pero en la naturaleza son muchos los animales que recurren a ella: las ovejas, los caballos y los peces marinos refuerzan esa capacidad de transporte entre el 16 y 74 por ciento, si las circunstancias lo requieren. Ahora, un estudio demuestra que la nototenia descamada (*Pagothenia borchgrevinki*) llega a multiplicarla más de un 200 por cien cuando nada en las aguas gélidas.

A semejanza de otros muchos peces autóctonos de la Antártida, la sangre de la nototenia contiene proteínas anticongelantes que le ayudan a soportar el frío glacial. Pero esas proteínas, junto con los glóbulos rojos, vuelven más viscosa la sangre y dificultan su bombeo. Algunos de esos peces han resuelto el problema prescindiendo de los glóbulos rojos y absorbiendo el oxígeno directamente del agua a través de las agallas y la piel, mientras aguardan inmóviles el paso de una presa. Por contra, la nototenia descamada se lanza a nadar bajo el hielo flotante en busca de krill y otros crustáceos sin quitar el ojo a sus enemigos, como los pingüinos o las focas. Para mantener esa actividad, «se necesita aportar más oxígeno a los músculos», explica Michael Axelsson, fisiólogo cardiovascular en la Universidad de Gotemburgo y uno de los autores del estudio, publicado el pasado enero en *Journal of Experimental Biology*.

Los autores compararon el hematocrito (la concentración de hematíes) en muestras de sangre extraídas a nototenias que descansaban en acuarios con el de las obtenidas de otros ejemplares que «pescaron» con un tubo de plástico. El hematocrito era del 9 por ciento en los peces en reposo, pero alcanzó el 27 por ciento en los que permanecieron activos, es decir, que mostraron un pico del 207 por ciento en la capacidad de almacenamiento de oxígeno en la sangre. «Ningún otro pez es capaz de duplicar o de reducir tanto el número de hematíes, que sepamos», confiesa Axelsson. El bajo hematocrito que muestra en reposo la nototenia reduce la sobrecarga del corazón. El bazo almacena los hematíes y, cuando los inyecta en el torrente sanguíneo, el peso del órgano llega a disminuir un 41 por ciento, según la investigación.

CONSERVACIÓN

Poner freno a la extinción

Un estudio muestra cómo reducir a la mitad el riesgo de desaparición de las especies tropicales

El cambio climático y la pérdida de hábitats suponen dos grandes amenazas para la supervivencia de la flora y la fauna, pero un nuevo estudio muestra que una gestión adecuada de ambos factores podría ayudar a prevenir extinciones. Recortar las emisiones de gases de efecto invernadero y proteger más tierras tropicales podría reducir a menos de la mitad el riesgo (o probabilidad) de extinción de las especies.

Es la primera vez que se evalúa el efecto combinado de limitar el calentamiento global y salvaguardar extensiones de tierra sobre la supervivencia de tantas especies, afirma Patrick Roehrdanz, investigador de la ONG Conservation International y uno de los autores del trabajo.

Se prevé que el cambio climático continúe alterando los hábitats naturales y obligue a más organismos a migrar o adaptarse. Los investigadores del estudio, publicado el pasado febrero en *Ecography*, analizaron la distribución geográfica actual y futura de 104.059 plantas y animales de Sudamérica, África y Asia, y la actual de otras 185.160 especies, en lo que supone la mayor compilación de datos de este tipo realizada hasta la fecha. A continuación, modelizaron el futuro riesgo de extinción de esas especies si se preservaran determinados porcentajes de las tierras tropicales (ahora mismo están protegidas menos de un 17 por ciento).



El tamarino león dorado (*Leontopithecus rosalia*) es un primate endémico del este de Brasil que se encuentra en peligro de extinción.



Los científicos hallaron que con una protección del 30 por ciento, unida a una reducción de la emisión de gases de efecto invernadero (en consonancia con el objetivo de mantener el calentamiento global por debajo de los dos grados Celsius con respecto a los valores preindustriales), el riesgo de extinción podría disminuir en más del 50 por ciento.

Estos resultados podrían guiar a los responsables de las Naciones Unidas, que tienen previsto reunirse este año. La Convención para la Diversidad Biológica, centrada en la conservación de la flora y la fauna, ha propuesto preservar el 30 por ciento de las tierras y océanos de la Tierra para 2030. La protección oficial contra la urbanización podría salvar ecosistemas vulnerables y paliar los efectos del cambio climático.

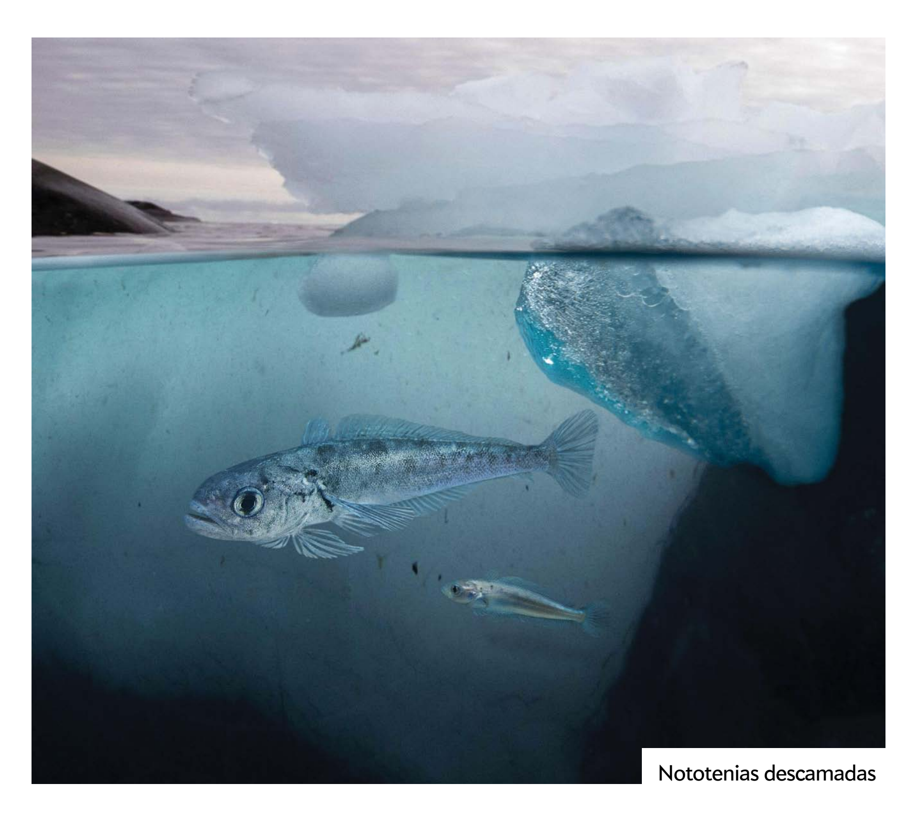
El modelo no tiene en cuenta cómo interaccionan las especies entre sí y con el entorno. Por ejemplo, puede que un colibrí se traslade a un nuevo emplazamiento, pero las plantas de las que depende no lo hagan. Aun así, en la opinión de Rachael Gallagher, bióloga de la Universidad Macquarie de Sidney que no participó en el estudio, el artículo «ofrece una base científica a los partidarios de ampliar las zonas protegidas del planeta».

—*Susan Cosier*

Las enormes oscilaciones del hematocrito sorprendieron al principio a Gerald Kooyman, biólogo marino del Instituto Scripps de Oceanografía que no ha participado en el estudio. Matiza, empero, que el pez posee de partida menos células sanguíneas, por lo que mantener la circulación con un recuento de hematíes multiplicado por tres no le resulta tan difícil. Si una foca de Weddell en inmersión aumentase el hematocrito del 40 al 90 por ciento, el bombeo de la sangre plantearía serias dificultades no exentas de riesgo.

Pero las nototenias descamadas no gozan de esa capacidad sin contrapartidas. Tras fijar una sonda medidora a la aorta del pez, los autores comprobaron que la presión sanguínea era un 12 por ciento mayor y el corazón trabajaba un 30 por ciento más en los individuos que nadaban. El corazón de la nototenia descansa durante los momentos de reposo, pero cuando tiene que nadar, «debe vivir con las consecuencias que conlleva disponer de más hematíes, pues precisa más oxígeno», apunta Axelsson.

—Priyanka Runwal



Nototenias descamadas

EPIDEMIOLOGÍA

El parásito de la malaria, una mezcla de cepas

Los científicos rastrean la procedencia del parásito en los hematíes de un individuo

Los cálculos cifran en 228 millones las personas que enfermaron por paludismo en 2018. Aun así, persisten incógnitas sobre el modo en que el parásito causante, *Plasmodium*, infecta a la especie humana a través de los mosquitos, así como sobre el aumento de la resistencia a los antipalúdicos. Las cepas del parásito intercambian sus genes cuando se reproducen sexualmente en el interior del mosquito, y las cepas mixtas resultantes infectan a las personas a través de las picaduras. Un nuevo estudio pinta un retrato pormenorizado del intercambio de genes en *Plasmodium* y revela que toda la diversidad genética hallada en una persona —hasta 17 cepas del parásito— puede proceder de una sola picadura. El trabajo se publicó en enero en la revista *Cell Host and Microbe*.

El ciclo biológico de *Plasmodium* transcurre en parte en el ser humano y en parte en el mosquito. En este último se multiplica, proceso en el que mezcla y combina sus genes. Hasta ahora, el modo más eficaz de estudiar su diversidad genética era triturar los mosquitos y secuenciar la papilla de ácidos nucleicos. La nueva técnica permite saber si los parásitos de un paciente en concreto son fruto de la multiplicación en un solo mosquito o proceden de la picadura de varios.

Los investigadores extrajeron muestras de sangre a pacientes de un hospital que atiende a varias poblaciones de Malawi y secuenciaron el genoma de los parásitos hallados en los hematíes infectados. En los genomas entremezclados descubrieron que casi todas las infecciones estudiadas procedían probablemente de la picadura de un único mosquito.

«Gracias a la secuenciación de los genomas individuales de parásitos aislados de poblaciones de mosquitos infectados, comenzaremos a saber realmente cómo se infecta la gente», afirma Ian Cheeseman, parasitólogo en el Instituto de Investigación Biomédica de Texas y uno de los autores principales del nuevo estudio. «A veces, basta con una sola picadura para que se transmita una cantidad asombrosa de diversidad genética.»

Los resultados coinciden con las sospechas de Dyann Wirth, investigadora de enfermedades infecciosas en la Universidad Harvard, que no ha participado en dicho estudio, a raíz de una investigación precedente. Considera el trabajo como «un importante avance que permitirá ahondar en la transmisión del paludismo y la recombinación».

Esta técnica también indicará la procedencia de las infecciones. Cuando una campaña de erradicación reduzca los casos en una zona concreta, el análisis de los hematíes de las personas que sigan enfermando indicará si los mosquitos infestados proceden de lejos o son supervivientes locales, explica Edward Wenger, director de investigación sanitaria global en el Instituto de Modelización de Enfermedades en Bellevue, Washington, ajeno al estudio. El método también puede ayudar a los expertos a vigilar la proliferación de las mutaciones que confieren resistencia. La detección de esas mutaciones y su contención constituye una estrategia esencial de salud pública, si se quiere preservar la eficacia de los antipalúdicos.

—Viviane Callier

PAULO OLIVEIRA, ALAMY

MATEMÁTICAS

Los falsos positivos en la COVID-19

La fiabilidad del resultado de la prueba de anticuerpos del coronavirus depende de la tasa de infección

Los investigadores que luchan contra la pandemia de la COVID-19 han diseñado pruebas que detectan anticuerpos en la sangre de las personas que han sido infectadas por el nuevo coronavirus. Estas pruebas serológicas pueden brindar datos importantes acerca de la propagación de la COVID-19 en la población. Por otra parte, existe la esperanza de que la presencia de ciertos anticuerpos confiera una inmunidad sustancial contra futuras reinfecciones, una posibilidad incierta que todavía está evaluándose. Pero las pruebas serológicas no están exentas de inconvenientes: detectan de igual modo los anticuerpos ineficaces, no indican si la infección permanece activa todavía y no la detectan si el organismo no ha generado aún los anticuerpos. Además, la carencia inicial de datos dificulta conocer la exactitud de toda prueba nueva.

Pese a ello, se ha propuesto su uso generalizado para averiguar si un individuo ya ha sido infectado por el virus. Pero una noción matemática dificulta la interpretación del resultado y, de hecho, la de cualquier otra prueba de detección sistemática o cribado: incluso con una prueba sumamente exacta, cuanto menor sea el número de personas infectadas en una población, mayor será la probabilidad de que un resultado positivo en una persona sea erróneo. Y la gente puede pensar que tiene anticuerpos y que goza de una posible inmunidad, cuando en realidad no es así.

En otras enfermedades, a una prueba de cribado positiva le sigue otra complementaria para confirmar el resultado, pero en el caso de la COVID-19 esto apenas se ha hecho, bien por la escasez de recursos, o bien porque los otros métodos de análisis se han reservado para los enfermos graves. A continuación, se ofrece una perspectiva de la enorme influencia que las tasas de infección pueden tener en la validez de ese tipo de pruebas a escala individual.

—Sarah Lewin Frasier

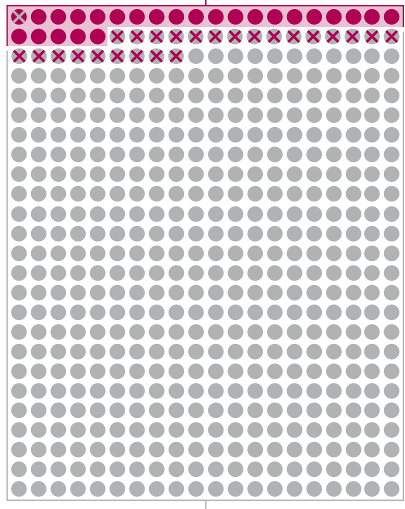
Una prueba que no sea cien por cien precisa puede generar cuatro resultados posibles en cualquier persona:

- La persona tiene los anticuerpos y la prueba da positivo
- La persona no tiene los anticuerpos y la prueba da negativo
- La persona tiene los anticuerpos pero la prueba da negativo (falso negativo)
- La persona no tiene los anticuerpos pero la prueba da positivo (falso positivo)

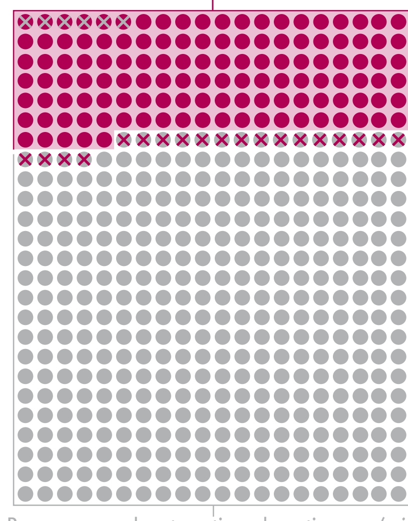
Una prueba que produce una **baja** proporción de **falsos positivos** tiene una **alta especificidad.**
Una prueba que produce una **baja** proporción de **falsos negativos** tiene una **alta sensibilidad.**

Si una prueba tiene una **especificidad** y una **sensibilidad del 95 por ciento,** respectivamente, significa que identifica correctamente el 95 por ciento de las personas que tienen anticuerpos y el 95 por ciento de las que no los tienen. Incluso aunque se dispongan de pruebas de detección muy precisas, dependiendo de la tasa de infección de la población, el resultado obtenido en una persona puede no ser fiable.

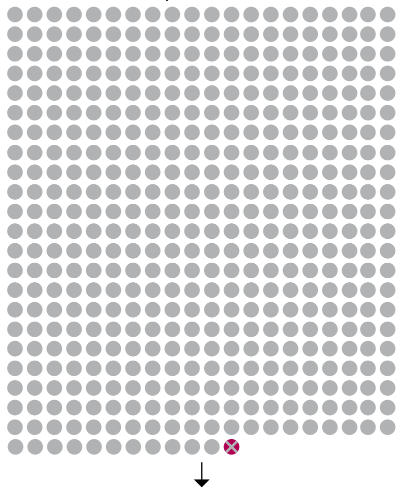
Si se utiliza una prueba con una **especificidad y sensibilidad del 95 por ciento** en una comunidad de 500 personas con una **tasa de infección del 5 por ciento,** los resultados tienen este aspecto:



Si se utiliza una prueba igual de precisa en una comunidad de 500 personas con una **tasa de infección del 25 por ciento,** los resultados son así:

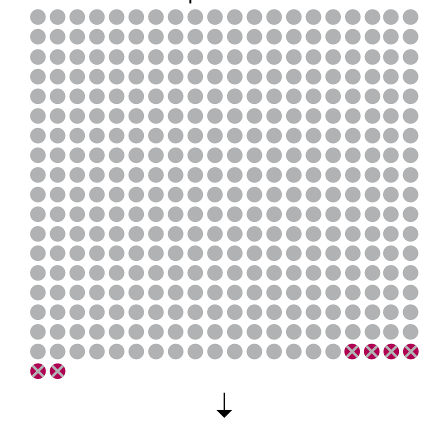


En esta situación, una persona que da negativo tiene una probabilidad del **99,8 por ciento** de no tener realmente los anticuerpos.



Pero una persona que da positivo solo tiene un **50 por ciento** de posibilidades de tener realmente los anticuerpos.

En esta situación, una persona que da negativo tiene una probabilidad del **98,3 por ciento** de no tener realmente los anticuerpos.



Y una persona que da positivo tiene un **86 por ciento** de posibilidades de tener realmente los anticuerpos.

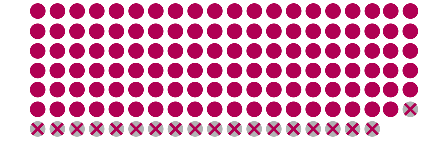


GRÁFICO DE AMANDA MONTAÑEZ



Pólipo masculino de una hidractinia en el que se observan las células germinales (*amarillo*).

BIOLOGÍA

Fecundidad perpetua

Descubierto el gen responsable de una rara facultad de un hidrozoo marino

De un animal traslúcido y piloso que funda colonias sobre la concha de un cangrejo ermitaño se puede decir que tiene un aspecto y un modo de vida extraños, pero las peculiaridades de la hidractinia no acaban ahí. Recientemente se ha identificado un gen clave —también presente en el ser humano— que dota a este habitante del fondo marino de una facultad extraordinaria: un suministro ilimitado de espermatozoides y óvulos. Según sus descubridores, esta es la primera vez que se confirma que la puesta en marcha de la producción de gametos en un ser vivo depende de un único gen.

Timothy DuBuc, biólogo del laboratorio del Colegio Swarthmore, es uno de los pocos estudiosos de las hidractinias, que comparten varios genes en común con los humanos. DuBuc y sus colaboradores probaron nuevos modos de extraer un gen, el *Tfap2*, del ADN embrionario del animal y manipularon su actividad en ciertas células, según relataron en febrero en *Science*. El cuerpo translúcido de la hidractinia permite observar sin grandes dificultades el efecto de la supresión del gen: cuando el animal alcanza la madurez no engendra óvulos ni espermatozoides. El equipo también confirmó que la activación del gen en las células madre del adulto las convierte en células germinales (precursoras de los espermatozoides y los óvulos) en un ciclo que se repite sin fin.

Cassandra Extavour, bióloga del desarrollo en la Universidad Harvard, ajena al proyecto, califica esos avances técnicos como «gesta heroica». Opina que el trabajo da a conocer varios modos de interferir con la función génica de la hidractinia, además de ofrecer el protocolo de edición génica más fiable hasta la fecha en los cnidarios, el grupo zoológico al cual pertenece la hidractinia y que comprende las medusas y las anémonas.

En otros animales, el gen *Tfap2* desencadena la formación de las células germinales una sola vez durante todo el desarrollo embrionario, aparte de participar en muchísimos otros procesos del crecimiento. En la especie humana, propicia la creación de una cantidad determinada de células germinales una sola vez durante el desarrollo, lo que posibilita la espermatogénesis y la oogénesis. La pérdida de esas células germinales provoca esterilidad, y la alteración de *Tfap2* se ha vinculado con el cáncer de ovario y de testículo. El estudio del gen en acción mejorará los conocimientos y tal vez el tratamiento de los trastornos de reproducción humanos, según los autores del estudio.

«Para aquellos de nosotros interesados en conocer el programa esencial que convierte a una célula en germinal, este podría ser el animal idóneo», concluye DuBuc.

—*Stephenie Livingston*

TIMOTHY DUBUC, SWARTHMORE COLLEGE (*hidractinia*); WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO (*rana*)

AGENDA

CONFERENCIAS VIRTUALES

1 de julio
La ciencia del tratamiento del agua
Ana Allende Prieto, CSIC
Fernando Beltrán Novillo, Universidad de Extremadura
Parque Científico y Tecnológico de Extremadura
www.oficinaparalainnovacion.es

3, 10, 17, 24 y 31 de julio - Ciclo
Cibercoloquio latinoamericano de matemáticas
Charlas impartidas por expertos en el campo
sites.google.com/view/cibercoloquio

EXPOSICIONES

Los colores del cielo profundo
Planetario de Madrid
Madrid
www.planetmad.es

Dicen que tienes veneno...
Museo de la Ciencia
Valladolid
www.museocienciavalladolid.es



Ante el cambio, cambiemos
Museo de las Ciencias
Valencia
www.cac.es

***Outbreak*: Epidemias en un mundo conectado**
Museo de Ciencias Naturales
Barcelona
museuciencies.cat

OTROS

Del 13 al 16 de julio – Jornadas virtuales
La uni climática
Organiza: *La Marea*
www.climatica.lamarea.com

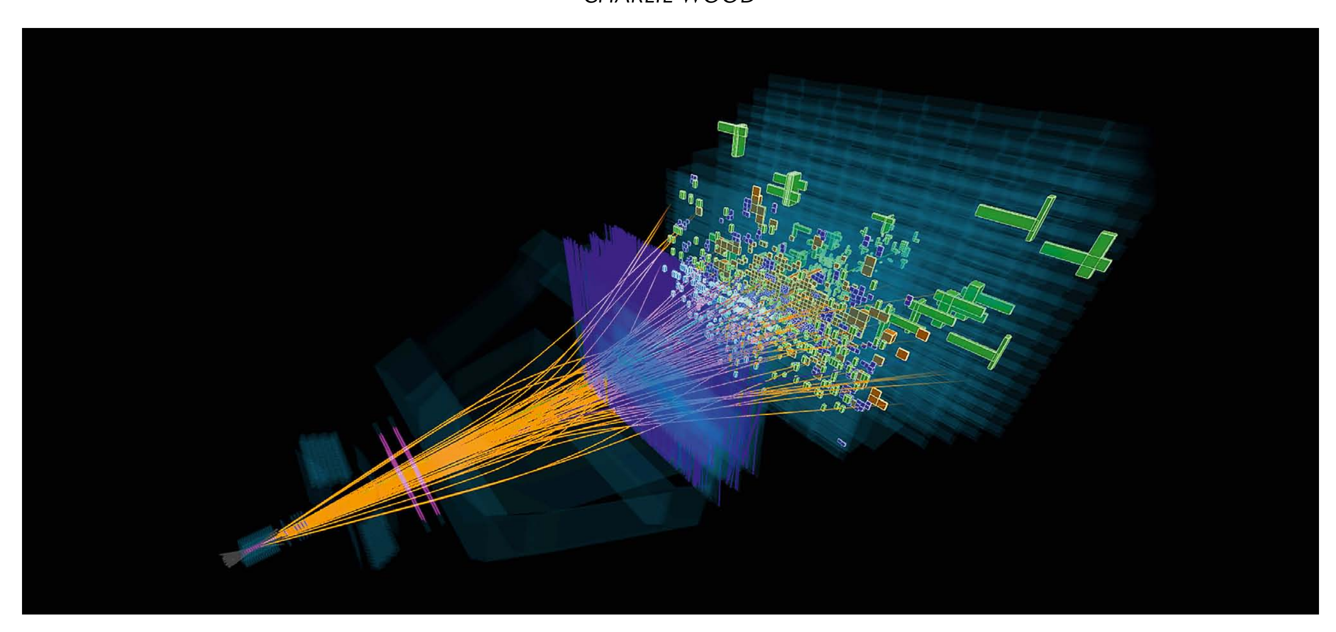
18 de julio – Observación
El cielo de julio, con Júpiter y Saturno
Observatorio Astronómico del Garraf
Olivella
planetari.cat

FÍSICA DE PARTÍCULAS

Los resultados anómalos se acumulan en el LHC

Las partículas conocidas como mesones *B* vuelven a mostrar un comportamiento que se desvía de las predicciones del modelo estándar. Aunque la significación estadística es aún insuficiente, el resultado aviva las esperanzas de encontrar nueva física

CHARLIE WOOD



RECONSTRUCCIÓN de uno de los eventos registrados en el detector LHCb, uno de los experimentos del Gran Colisionador de Hadrones del CERN, en Ginebra.

CERN/COLABORACIÓN LHCB

En medio de los caóticos procesos que se desencadenan en los choques de protones que tienen lugar en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), ha aparecido una partícula que parece desintegrarse de manera peculiar.

Todas las miradas están puestas en los mesones *B*, un tipo de partícula compuesta por dos quarks. Ante los repetidos indicios de su comportamiento anómalo, los físicos del experimento LHCb llevan años analizando las raras colisiones en que se producen estos mesones con la esperanza de inferir a partir de ellas la existencia de alguna nueva partícula o fenómeno físico.

En un trabajo reciente, los investigadores han hallado que varios resultados relativos a las desintegraciones de mesones *B* entran en conflicto con las predicciones del modelo estándar, el conjunto de ecuaciones empleadas por los físicos para describir el mundo subatómico. Tomados de uno en uno, cada uno de esos resultados no parece más que una fluctuación estadística que, como ya ha ocurrido en el pasado, bien podría desvanecerse a medida que se acumulen más datos. Sin embargo, su deriva colectiva sugiere que podrían ser los primeros indicios de una teoría más completa que el modelo estándar.

«Por primera vez en toda mi carrera estoy viendo una confluencia de desintegraciones que apuntan a una misma anomalía», afirma Mitesh Patel, físico del Colegio Imperial de Londres y miembro de la colaboración LHCb.

Desintegraciones exóticas

Los mesones *B* reciben ese nombre porque contienen un quark de tipo *b*, una de las seis variedades de quarks existentes en la naturaleza. Por alguna razón que los físicos no entienden bien, los seis tipos de quarks se clasifican en tres grupos, o «generaciones». Cada una de ellas es más masiva que la anterior e incluye dos quarks, uno con carga eléctrica positiva y otro con carga negativa. Los quarks de mayor masa se desintegran en sus versiones más ligeras y, en el proceso, su carga eléctrica casi siempre cambia de signo. Así, cuando en un mesón *B* se produce la desintegración del quark *b* (muy masivo y de carga negativa), la mayoría de las veces se convierte en un quark de tipo *c* (de peso medio y carga positiva).

La colaboración LHCb rastrea los pocos casos en los que esta regla no se cumple. Por cada millón de desintegraciones de mesones *B*, hay una en la que el quark *b* se rebela y se convierte en un quark de tipo *s*, descendiendo una generación pero conservando su carga negativa. El modelo estándar predice la frecuencia, extremadamente baja, con que tendrían que producirse tales desintegraciones y cómo estas deberían desarrollarse. Pero, dado que se trata de procesos muy inusua-

les, la posible influencia de nuevas partículas o efectos físicos debería dejarse ver con facilidad en ellos.

Procesos inesperados

El nuevo trabajo de la colaboración LHCb analizó unas 4500 desintegraciones exóticas de mesones *B*, aproximadamente el doble que en un estudio previo publicado en 2015. Cada uno de estos eventos acaba generando cuatro partículas que inciden contra un detector con forma de anillo. Al medir los ángulos en que salían despedidas dichas partículas y comparar los resultados con las predicciones del modelo estándar, los investigadores hallaron una discrepancia con respecto al patrón esperado. La significación estadística de la anomalía observada ahora es mayor que la obtenida en el último análisis, y los autores sostienen que el nuevo resultado proporciona una imagen más unificada. «De repente, la compatibilidad entre los distintos observables angulares ha mejorado mucho», señala Felix Kress, miembro de la colaboración LHCb que ayudó a realizar los cálculos.

Estadísticamente, la desviación en el patrón angular observado equivale a lanzar una moneda 100 veces y obtener 66 caras, en lugar de las aproximadamente 50 que cabría esperar. Para una moneda justa, la probabilidad de que eso ocurra es de 1 entre 1000.

Sin embargo, dado el gigantesco número de colisiones que se producen en el LHC, es esperable que aparezcan fluctuaciones estadísticas, por lo que una desviación de ese calibre no cuenta como prueba de que algo falle en el modelo estándar. Para ello, los investigadores tendrían que acumular un número de desintegraciones lo bastante elevado como para certificar una desviación equivalente a 1 entre 1,7 millones, similar a obtener 75 caras en 100 lanzamientos de moneda. «Si este resultado obedece a nueva física», apunta Jure Zupan, físico teórico de la Universidad de Cincinnati, «no es lo suficientemente significativo».

Aun así, el patrón observado indica que algo no acaba de cuadrar en los productos de desintegración de los mesones *B* pertenecientes a la familia de los leptones, el otro gran grupo de partículas de materia aparte de los quarks. Al igual que estos, los leptones también se clasifican en tres generaciones de masa creciente: el electrón, el muon y la partícula tau, respectivamente. El modelo estándar establece que todos ellos son idénticos salvo por su masa. Cada desintegración de un mesón *B* acaba produciendo un par de leptones gemelos de cualquiera de los tres tipos. El nuevo trabajo se centró en el patrón angular generado en los casos en que se producían dos muones, los cuales resultan más fáciles de detectar.

Por otro lado, el experimento también ha registrado algunas de las desintegraciones de mesones *B* que acaban produciendo un par de electrones. El modelo estándar predice que ambos tipos de desintegraciones, en muones y en electrones, tendrían que desarrollarse de la misma manera. Sin embargo, en 2014 la colaboración LHCb halló indicios de una desproporción entre el número de eventos que generan muones y aquellos que acaban en electrones. En conjunto, tales anomalías podrían indicar que la posible nueva física no solo afecta a los muones, sino también a los electrones.

En estos momentos, el grupo de Patel trabaja en una nueva comparación de las desintegraciones en muones y en electrones. Según el investigador, tales mediciones son mucho más «limpias» e inequívocas que las relativas al patrón angular observado solo con muones. «Este es un asesino del modelo estándar», zanja.

¿Nueva física?

Si las anomalías en el comportamiento de los mesones *B* se confirman, los físicos tienen dos teorías principales para explicarlas.

Una posibilidad es que la responsable de las anomalías sea una nueva partícula apodada bosón Z'. Esta sería portadora de una nueva fuerza de la naturaleza, similar en algunos aspectos a la interacción débil, pero actuaría de manera distinta sobre electrones y muones. Además, el bosón Z' implicaría la existencia de una partícula masiva adicional que, en caso de existir, podría explicar la composición de la materia oscura. «Estamos avanzando hacia el siguiente paso, consistente no solo en explicar esta anomalía, sino en conectarla con otros problemas», apunta Joaquim Matias, físico teórico de la Universidad Autónoma de Barcelona.

Otra posibilidad es que los resultados se deban a la existencia de un nuevo tipo de partículas conocidas como leptoquarks, las cuales podrían transformar un quark en un leptón y viceversa. Aunque hace tiempo que los teóricos vienen contemplando su existencia, la idea fue perdiendo popularidad a medida que los experimentos iban descartando los modelos más simples. Con todo, lo cierto es que las tres generaciones de quarks guardan un sospechoso parecido con las tres generaciones de leptones, algo que los físicos no entienden bien. En este sentido, las desintegraciones de mesones *B* podrían estar apuntando a la existencia de una relación entre ambas familias de partículas mediada por leptoquarks. «Ese es el sueño», admite Zupan.

Mientras los teóricos consideran estas posibilidades, los físicos del experimento LHCb seguirán lanzando monedas hasta que el número de caras les permita determinar si se hallan o no ante una moneda trucada; un esfuerzo que puede llevarles el resto de la década.

Entretanto, la comunidad de física de partículas esperará los resultados de otros experimentos, como Belle II, en Japón, o cualquiera de los dos detectores principales del LHC. Confirmar o refutar las anomalías observadas hasta ahora en los mesones *B* será un esfuerzo hercúleo, pero los físicos tienen a su disposición las herramientas necesarias. «Con cuatro experimentos que pueden contribuir, el futuro es brillante», concluye Zupan.

Charlie Wood *es periodista científico especializado en física. Ha publicado en* Scientific American*,* The Christian Science Monitor *y* LiveScience *y es redactor colaborador de* Quanta Magazine.

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



PARA SABER MÁS

Test of lepton universality using $B^+ \rightarrow K^+l^+l^-$ decays. Colaboración LHCb en *Physical Review Letters*, vol. 113, art. n.º 151601, octubre de 2014.

Measurement of *CP*-averaged observables in the $B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-$ decay. Colaboración LHCb en arxiv.org/abs/2003.04831, 10 de marzo de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Indicios de nueva física en el LHC? Joaquim Matias en *IyC*, agosto de 2017.

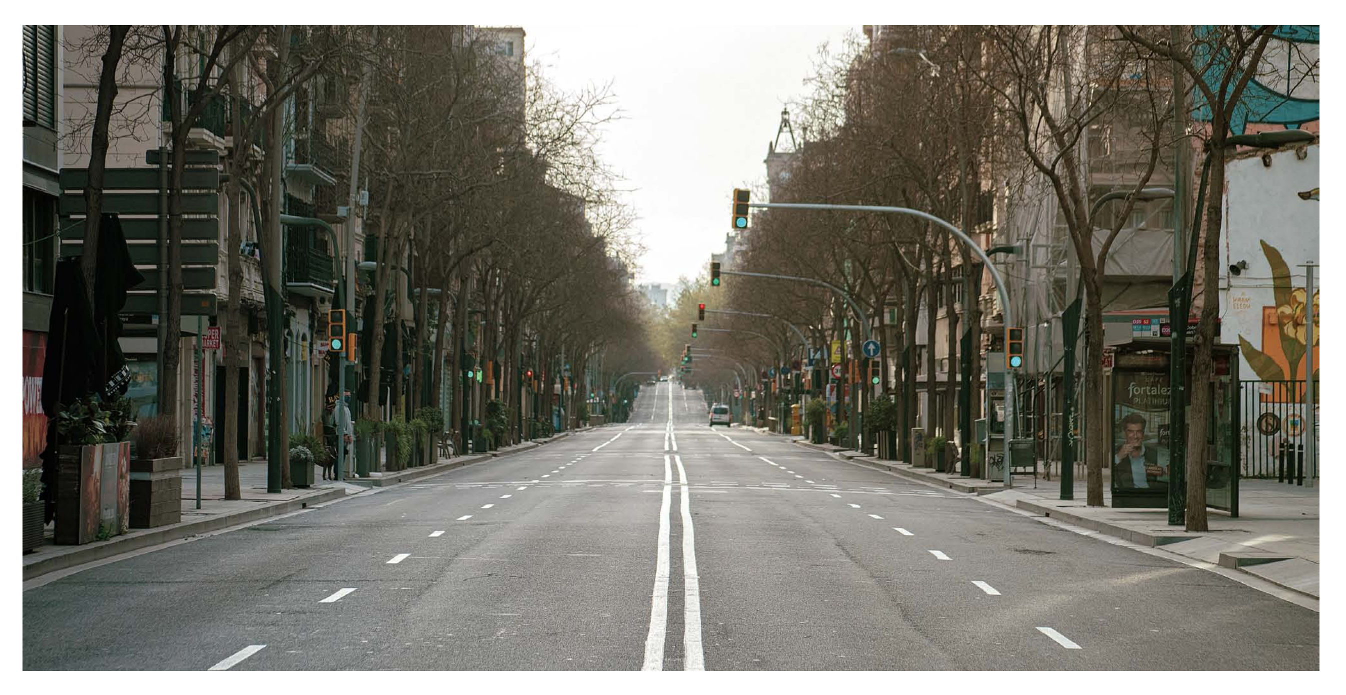
Medir la belleza. Guy Wilkinson en *IyC*, enero de 2018.

CAMBIO CLIMÁTICO

¿Cómo se han reducido las emisiones de carbono por la pandemia de COVID-19?

Los datos revelan los sectores, los países y los acontecimientos que han tenido la mayor repercusión. Sin embargo, no está claro cuánto durará esa disminución

JEFF TOLLEFSON



EL CONFINAMIENTO POR LA PANDEMIA ha llevado a una reducción de las emisiones de carbono, a la que ha contribuido la drástica disminución del tráfico de vehículos.

GETTY IMAGES/DENNIS GLEISS/ISTOCK

Según estimaciones detalladas realizadas por dos equipos de investigación independientes, la respuesta internacional a la pandemia de coronavirus ha reducido hasta ahora las emisiones globales de carbono en más del 8 por ciento, lo que equivale a un volumen tres veces superior a las emisiones anuales de Italia. Sin embargo, el consumo energético ya está repuntando tanto en China como en otros lugares. A medida que se levantan los confinamientos impuestos por los Gobiernos, la pandemia podría quedar registrada como poco más que una pequeña anomalía en el sistema climático.

La mayoría de los informes sobre emisiones de carbono se realizan anualmente, pero el inusitado impacto social y económico causado por la pandemia ha suscitado el interés por observar la evolución de la energía y las emisiones en tiempo real. A partir de la información de distintas fuentes (informes energéticos y climáticos, observaciones de satélite y datos de tráfico recopilados por sistemas de navegación de vehículos en más de 400 ciudades del planeta), dos equipos internacionales han realizado los primeros cálculos sobre las variaciones diarias de las emisiones de carbono a escala global.

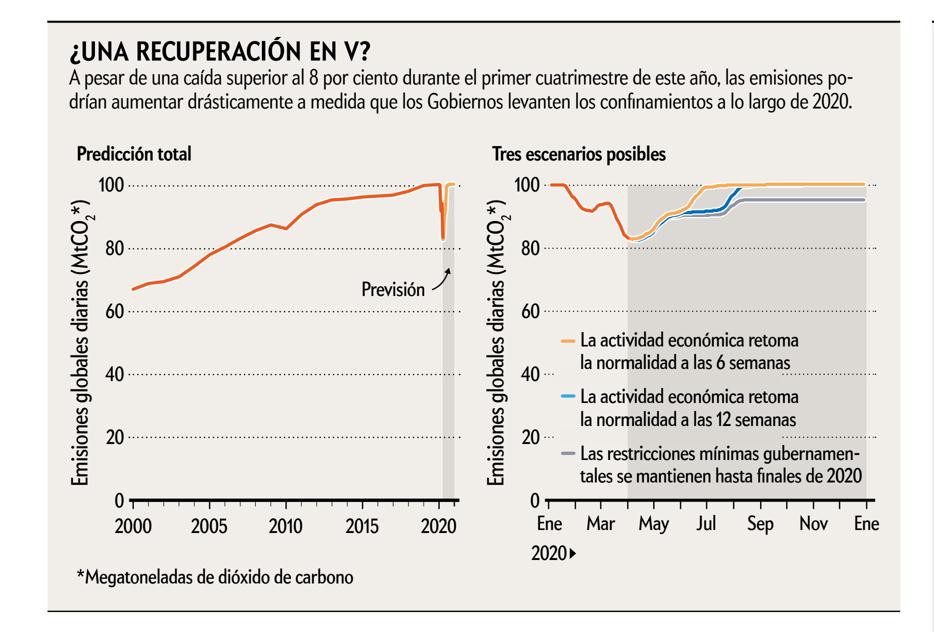
Si bien difieren en ciertos detalles, los análisis llegan a conclusiones similares: las emisiones de carbono disminuyeron en más de mil millones de toneladas durante el primer cuatrimestre del año en comparación con el mismo período en 2019.

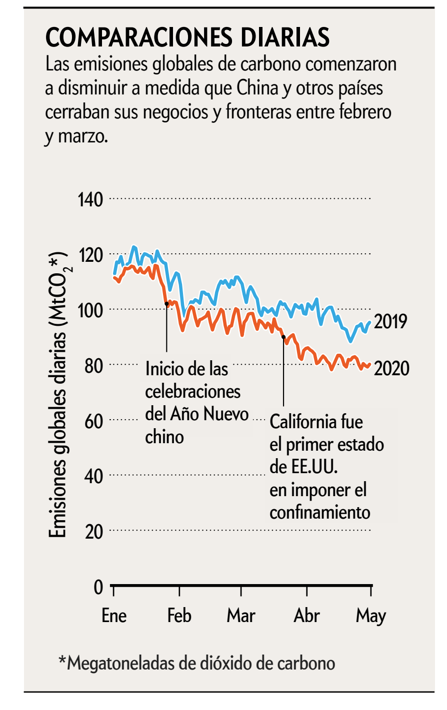
«La pregunta estaba en el aire», señala Corinne Le Quéré, climatóloga de la Universidad de Anglia Oriental en Norwich y autora principal de un estudio publicado el 19 de mayo en *Nature Climate Change*. «Hemos aplicado dos métodos distintos, por lo que es bastante alentador ver que nuestros resultados son equiparables.»

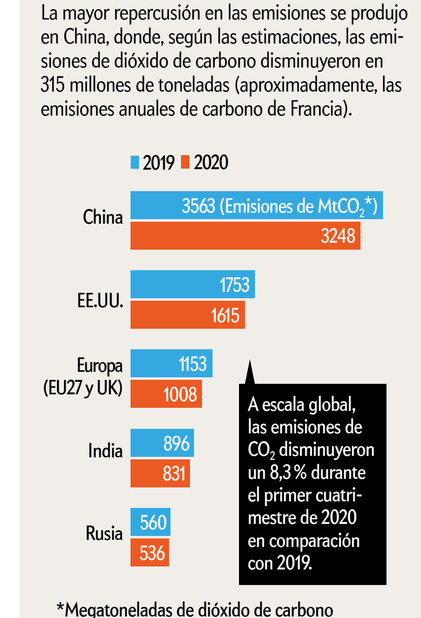
El equipo de Le Quéré reunió información sobre las emisiones diarias de diferentes sectores en diversas ciudades, regiones y países, y después analizó las medidas tomadas por los Gobiernos para controlar la propagación del coronavirus.

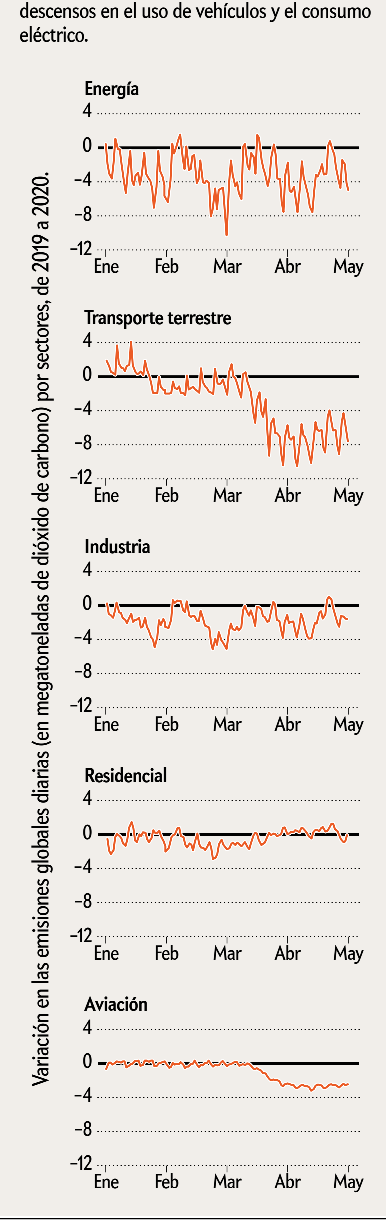
Asumiendo que tales medidas se relajarán en el transcurso del presente año, el equipo prevé que las emisiones globales acumuladas para 2020 podrían disminuir entre un 4 y un 7 por ciento, lo que supondría la mayor caída desde la Segunda Guerra Mundial (*véase el gráfico* «¿Una recuperación en V?»). «Nunca habíamos visto nada igual», afirma Le Quéré.

De hecho, la magnitud de la reducción de este año podría equipararse a las reducciones anuales que serían necesarias para cumplir con los objetivos del acuerdo climático de París de 2015, que pretende limitar el calentamiento global a entre 1,5 y 2°C por encima de los niveles preindustriales. Sin embargo, si la recesión económica de 2008 ha de valernos como guía de referencia, las emisiones podrían recuperarse con rapidez.





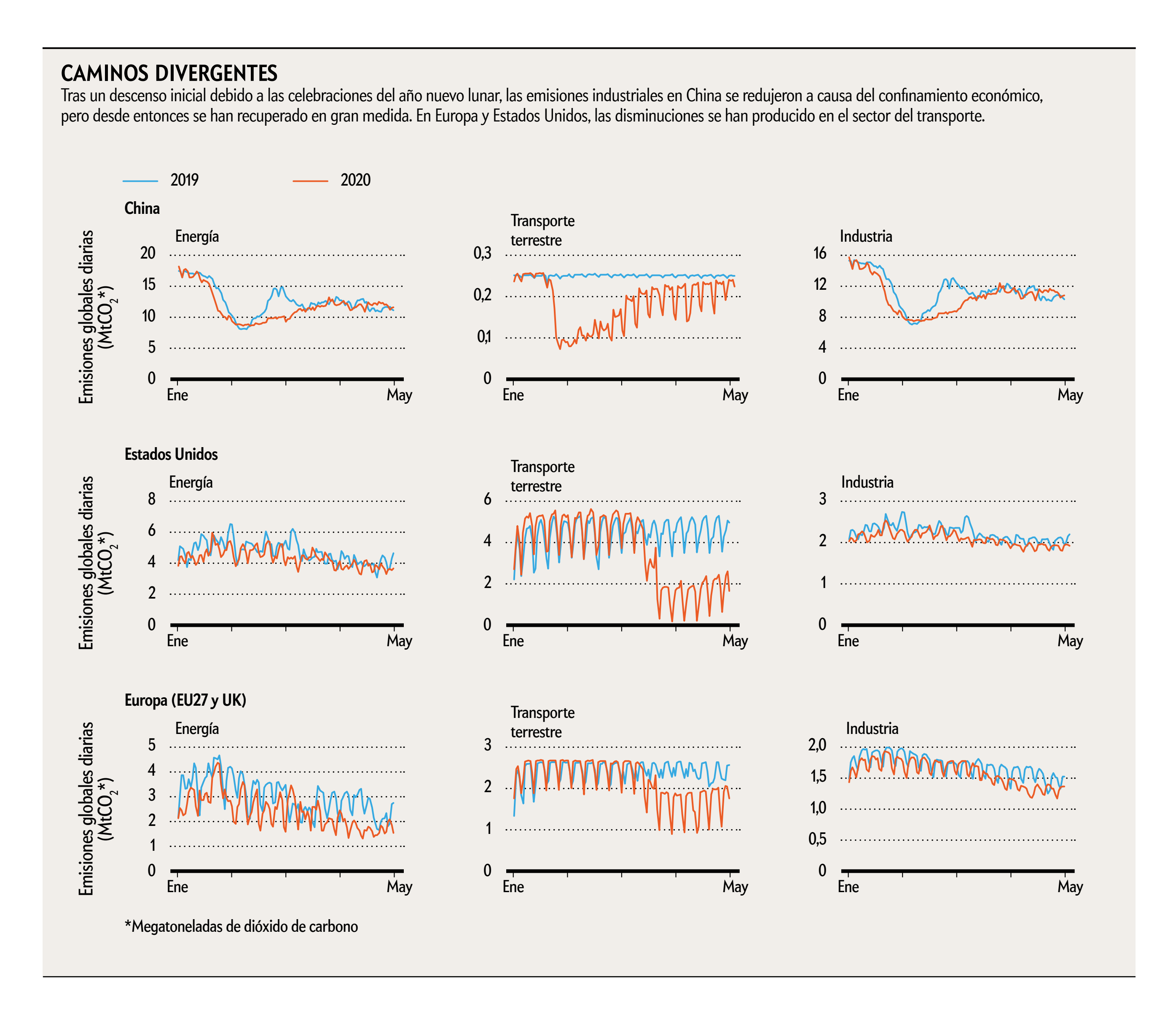




La pregunta es si las sociedades cambiarán y si los Gobiernos adoptarán una agenda energética baja en carbono a medida que traten de estimular la economía, opina Philippe Ciais, investigador del ciclo del carbono en el Laboratorio de Ciencias del Clima y el Medioambiente en Gif-sur-Yvette, en Francia, que dirige un segundo estudio para observar la evolución de las emisiones globales en tiempo casi real. «A partir de esos datos esperamos hallar respuestas.»

El equipo de Ciais está elaborando el prototipo de un sistema de seguimiento que opera con escalas de tiempo de días y semanas. Han analizado datos energéticos de más de 400 ciudades y 130 países, así como datos meteorológicos a escala global para realizar estimaciones diarias de las emisiones de carbono en 2019 y 2020. De acuerdo con sus resultados preliminares, las emisiones globales comenzaron a diferir notablemente de las del año pasado en marzo, a medida que los países de todo el mundo comenzaban a cerrar negocios y a aplicar medidas de distanciamiento social (*véase* «Comparaciones diarias»).

Como era de esperar, China encabezó la reducción (*véase* «China a la cabeza»). Las cifras del mayor productor mundial de gases con efecto invernadero iniciaron su brusca caída en enero, pero gran parte de esa disminución coincidió con una reducción anual del consumo energético a comienzos del Año Nuevo chino. Los confinamientos sirvieron para mantener unos niveles más bajos de emisión en todo el país, lo que representó una reducción del 10 por ciento hasta finales de marzo en comparación con el año pasado. Al tiempo que la actividad económica se recuperaba en China, otros países comenzaron sus confinamientos, lo que redujo las emisiones globales durante el mes de abril.



La industria de la aviación experimentó una drástica reducción, y sus emisiones cayeron más del 21 por ciento durante el primer cuatrimestre. Sin embargo, las mayores caídas, en cifras absolutas, se produjeron en los sectores de la energía eléctrica y el transporte terrestre (*véase* «Carreteras y energía»).

La demanda eléctrica comercial e industrial disminuyó conforme los negocios cerraban y las personas de todo el mundo dejaron sus coches aparcados y permanecieron en casa (*véase* «Caminos divergentes»). «Ese es uno de los aspectos más destacables: la población seguía conduciendo durante la recesión económica de 2008, pero ahora no», explica el colaborador Steven Davis, investigador del sistema terrestre de la Universidad de California en Irvine. Los datos y las metodologías desarrolladas por Ciais y su equipo están pendientes de publicación en una revista especializada revisada por pares.

El estudio podría ayudar a llenar una enorme laguna en el seguimiento de las emisiones. «Tiene un enorme potencial», asegura Bill Hare, director de *Climate Analytics*, una consultora sin fines lucrativos con sede en Berlín. En última instancia, según Hare, se necesitará observar la evolución de las emisiones en tiempo casi real a medida que los países tomen medidas para reducirlas, lo que probablemente implique desarrollar tanto estrategias de seguimiento energético como sistemas de satélite que permitan estudiar con detalle la forma en que el consumo energético, y por tanto, las emisiones, varían en respuesta a las políticas climáticas.

Jeff Tollefson *es periodista científico especializado en clima, energía y medioambiente.*

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 582, págs. 158-159, 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Temporary reduction in daily global CO_2 emissions during the COVID-19 forced confinement. Corinne Le Quéré, et al. en *Nature Climate Change*, mayo de 2020.

COVID-19 causes record decline in global CO_2 emissions. Prepublicado en el repositorio arXiv, mayo de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cambio climático: ¿Cómo combatirlo? VV.AA. Colección *Especial*, 2019.

El peor escenario climático posible no es el más probable. Zeke Hausfather y Glen P. Peters en *IyC*, marzo de 2020.



UNA NUEVA ERA PARA EL ALZHÉIMER

ES EL MOMENTO DE COMENZAR DE NUEVO. Ha transcurrido más de un siglo desde que el neuropatólogo Alois Alzheimer impartiera la primera conferencia científica en la que describió la enfermedad que hoy lleva su nombre, pero seguimos sin disponer de tratamientos eficaces contra este ladrón de mentes, menos aún de una cura. En la actualidad, entre 40 y 50 millones de personas padecen alzhéimer y otras demencias. Los fármacos que se han sometido a prueba, centrados en un único tipo de lesión, han fracasado dolorosamente una y otra vez. Los investigadores comienzan a afirmar que ha llegado la hora de replantear la estrategia contra la enfermedad.

Es obvio que los pacientes y sus familias conocen esas dificultades desde hace décadas. En este informe especial ofrecemos una visión general sobre el conocimiento actual del alzhéimer e indagaremos en el espectro de sus causas, que abarca desde problemas en el seno del cerebro hasta alteraciones en el ambiente. Los neurocientíficos han descubierto cinco áreas (como las reacciones inmunitarias en los tejidos cerebrales) que han recibido escasa atención pero podrían contener el germen de una nueva esperanza (*página 20*). Acto seguido, revisaremos con visión crítica la «hipótesis del amiloide», que ha dominado hasta ahora la búsqueda de tratamientos, y comprobaremos si aún mantiene su vigencia (*página 24*). Retomaremos otro campo relegado, el de la investigación de la mujer, expuesta a un riesgo mucho mayor de contraer la enfermedad que el varón, y describiremos los nuevos estudios acerca del papel de los estrógenos y de la menopausia en el deterioro mental (*página 27*). Para acabar, examinaremos análisis recientes que demuestran que la contaminación atmosférica agrava el riesgo de alzhéimer de forma insospechada y exploraremos el vínculo entre el aire contaminado y el deterioro del cerebro (*página 33*).

—*Josh Fischman*

Ilustraciones de Galen Dara



SUMARIO

Bases neurobiológicas 20

Infografía: La eliminación de las proteínas defectuosas 23

El conflicto de los fármacos antiamiloideos 24

El nexo entre la menopausia y el alzhéimer 27

Infografía: La carga del alzhéimer 30

La influencia de la contaminación 33

Infografía: Aire nocivo, cerebros dañados 36

Kenneth S. Kosik es médico investigador y ha dirigido proyectos sobre el alzhéimer precoz. Su laboratorio intervino en el descubrimiento de los ovillos de tau, característicos de la enfermedad. Es profesor Harriman de Investigación en Neurociencias y codirector del Instituto de Neurociencias de la Universidad de California en Santa Bárbara.



EL FUTURO DE LA MEDICINA
UNA NUEVA ERA PARA EL ALZHÉIMER

LAS BASES NEUROBIOLÓGICAS DEL ALZHÉIMER

Ante nuestra incapacidad para hallar un tratamiento eficaz, ha llegado la hora de reexaminar la biología básica de esta enfermedad. Los avances en cinco áreas fundamentales despiertan nuevas esperanzas

Kenneth S. Kosik

NINGÚN OBSTÁCULO INSALVABLE NOS IMPIDE CONCEBIR un tratamiento eficaz contra la enfermedad de Alzheimer. En otros problemas de la naturaleza humana, como la violencia, la codicia y la intolerancia, confluyen una desconcertante diversidad de causas e incertidumbres, pero el alzhéimer es, en esencia, una cuestión de biología celular, cuya solución debería estar a nuestro alcance. Es harto probable que la comunidad científica ya cuente con un remedio que permanezca ignorado entre la multitud de viales almacenados en los congeladores de los laboratorios. Y es posible que conceptos fundamentales esperen a ser descubiertos, ocultos en bases de datos o registros de historias clínicas, perfiles neuropsicológicos, estudios de neuroimagen, biomarcadores sanguíneos y cefalorraquídeos, genomas, análisis de proteínas, registros neuronales o modelos animales o celulares.

Esas pistas han pasado desapercibidas porque durante décadas nos hemos dedicado con afán a la caza de novedades de relumbrón en la investigación del alzhéimer, en lugar de reflexionar meditadamente sobre la base biológica de este mal. Hemos basado nuestra labor en una serie de suposiciones. Una de ellas es el papel cardinal y dominante del fragmento de proteína llamado amiloide beta, que cuenta con un ingente volumen de datos que respalda su importancia en la enfermedad. Y aunque hemos formulado fármacos que reducen las concentraciones de este péptido en los enfermos, en general no hemos conseguido frenar sensiblemente el deterioro cognitivo.

Ahora parece simplista dar por sentado que la eliminación o la inhibición del amiloide beta vaya a curar o aliviar a quienes la padecen, sobre todo sin un conocimiento mucho más profundo y completo de su origen y evolución [*véase el recuadro* «El conflicto de los fármacos antiamiloideos»]. Aunque no hemos errado el tiro del todo, el afán nos ha llevado a dejar de lado otros objetivos y hasta los mismos fundamentos de este en particular.

Es hora de volver a lo básico. Llevo treinta años investigando el alzhéimer, he participado en grandes proyectos con familias proclives a padecerlo, he estudiado estrategias de prevención y la fisiología del daño neuronal intrínseco a la enfermedad. Mis colaboradores y yo,



especialistas en muy diversas disciplinas científicas y médicas, creemos que es preciso revisar la fisiología y la biología fundamentales del alzhéimer y volver a examinar el contenido de las bases de datos y de los frigoríficos de nuestros laboratorios en busca de pistas que hayamos pasado por alto. Esperamos que este enfoque nos permita concebir teorías y modelos sobre la evolución de la enfermedad, a partir de los cuales planear nuevas estrategias contra ella. Es posible ampliar los conocimientos en al menos cinco vías de investigación que podrían ser fructíferas y oportunas —basadas en importantes descubrimientos acaecidos en los últimos años—, que considero muy probable que saquen a la luz las nociones necesarias para hallar tratamientos eficaces. Abarcan desde las alteraciones en la eliminación de las proteínas nocivas en las células cerebrales hasta las lesiones inflamatorias, pasando por los fallos en la transmisión de las señales eléctricas. Pertenecen a ámbitos diferentes, pero si concurren en una persona, hacen enfermar al cerebro y, por separado o en conjunto, podrían ser las culpables de los estragos del alzhéimer.

FALLOS EN LA ELIMINACIÓN DE PROTEÍNAS

A principios de la década de 1900, varios neuropatólogos —entre ellos Alois Alzheimer, quien da nombre a la enfermedad— comenzaron a describir lesiones microscópicas en el cerebro de pacientes que habían fallecido con demencia. Hoy sabemos que son aglomerados de proteínas deformes. En el caso del alzhéimer, unos se componen de fragmentos de proteína amiloide beta y son llamados placas seniles, que se sitúan entre las neuronas. Otros, los aglomerados de proteína tau, son los ovillos neurofibrilares y radican en el seno de las neuronas.

Más de un siglo después, aún no sabemos por qué esas células no eliminan los grumos. Los mecanismos de eliminación de las proteínas defectuosas son tan antiguos como la vida. ¿Qué falla en el alzhéimer? Esta pregunta es tan esencial en el proceso patológico de la enfermedad como lo es la pérdida del control de la división celular en el cáncer. Recientes observaciones de investigadores de la Universidad de Washington en St. Louis, entre otras instituciones, indican que las proteínas anómalas saldrían de las células, quizás evadiendo sus sistemas de detección. Ignoramos lo que sucede, pero saberlo seguramente sería un buen comienzo para averiguar cómo y por qué progresa el alzhéimer.

Las células poseen dos grandes sistemas para deshacerse de tales proteínas: el sistema ubicuitina-proteasoma (UPS) y la autofagia. En el primero, las proteínas se introducen en un complejo celular con forma de barril llamado proteasoma, donde son troceadas en partes reutilizables; en el segundo, la célula envuelve a las proteínas aberrantes y las destruye por completo. Las neuronas se sirven de ambos para controlar la composición de los canales de comunicación intercelular (estructuras anatómicas llamadas axones, dendritas y sinapsis), de modo que se fortalecen o se debilitan durante el aprendizaje. (A veces, las neuronas expulsan las proteínas dañadas y dejan su destrucción en manos de la microglía, las células del encéfalo que forman parte del sistema inmunitario.) Que la proteína acabe en el UPS o sea autofagocitada depende básicamente de su tamaño. El proteasoma posee en cada extremo un poro angosto que permite la entrada de una fina hebra de proteína filiforme. En el interior la aguardan enzimas que la descompondrán en sus aminoácidos constituyentes, que serán reciclados en la síntesis de nuevas proteínas. Las más voluminosas que no caben en el proteasoma, como los aglomerados proteicos y las proteínas viejas y deformes con daños seniles, son transportadas hacia el sistema autofágico y su máquina de destrucción más poderosa, el lisosoma.

En el alzhéimer algo no funciona y las neuronas retienen esos pedazos de tau y amiloide que las dañan o sofocan aún más. Si desentrañáramos los entresijos de estos sistemas, aprenderíamos muchísimo sobre su patogenia. Es preciso, pues, estudiar las diferencias concretas que caracterizan las vías de degradación en cada tipo de neurona, así como el mecanismo exacto por el que estos sistemas de eliminación reconocen las proteínas anómalas. Las malformaciones como las que muestra la tau no se producen en un solo paso. Las proteínas a veces mutan y acumulan modificaciones que las predisponen a un plegamiento incorrecto, que a su vez facilita su agregación en cantidades crecientes a lo largo de un proceso con múltiples etapas. ¿En qué momento se activan los sistemas de vigilancia y son reconocidas como anómalas? Conocer a fondo este tipo de procesos podría llevarnos a un planteamiento más estratégico del tratamiento y de la intervención farmacológica.

Un dato intrigante a la hora de entender la evasión es que la tau es capaz de salir fuera de la célula y ser captada por las células vecinas. Se desconoce la finalidad de este tránsito. ¿Acaso es habitual el intercambio de proteínas entre las células? ¿O así se deshacen de una proteína anómala que puede ser tóxica? Creemos que en el alzhéimer por lo menos una parte de la proteína tau que sale fuera de la célula ya muestra un plegamiento erróneo. Y cuando penetra en una célula aledaña parece crear una plantilla anómala que otras proteínas tau de esta célula imitan adquiriendo similares formas extrañas. En suma, cuando la tau se propaga, las células vecinas copian la forma de la recién llegada.

De esas observaciones en el medio extracelular ha surgido la idea de administrar al paciente un anticuerpo que la intercepte y la elimine en ese punto. Pero es poco probable que funcione a menos que sepamos perfectamente la deformación que sufre la tau cuando se vuelve dañina. Diseñar un anticuerpo que sea sumamente específico exige conocer con minuciosidad la estructura de la proteína. Otra incógnita por despejar es dónde se encuentra la tau en el complejo espacio intercelular. En concreto, ¿se desplaza a través de las sinapsis (la interfaz transmisora de las señales entre dos neuronas)? La hendidura

sináptica es un intersticio estrecho, de difícil acceso para un anticuerpo. Sería más conveniente conocer el mecanismo exacto de expulsión de la tau y los receptores con los que las células vecinas la captan; experimentos en curso en mi laboratorio persiguen revelar la identidad de uno de esos receptores.

IDENTIFICACIÓN DE LOS CAMBIOS DE LAS PROTEÍNAS

Un avance importante en la investigación del alzhéimer fue la reciente obtención de imágenes de la tau alterada en el seno de la neurona, enmarañada en un ovillo neurofibrilar, con un grado de detalle nunca visto. La extraordinaria fotografía publicada en *Nature* en 2017 mostraba miles de proteínas tau alineadas en parejas estrechamente unidas, con una configuración en forma de C. Tal vez el estudio de la estructura de esa inclusión sólida aporte la información necesaria para diseñar pequeñas moléculas que encajen en las grietas de la proteína aberrante y la disgreguen poniendo fin al proceso patológico.

Ahora bien, romper tales estructuras se presume harto complicado por muchos motivos, entre ellos y no el menos importante, la gran cohesión del ovillo. Quizás una mejor manera de abordar el problema sea averiguar la secuencia de acontecimientos por los que pasa la proteína tau, desde su estado normal de consistencia líquida al estado más rígido y sólido que se aprecia en la citada imagen, y descubrir las modificaciones que precipitan esa transformación.

El paso del estado líquido al sólido se denomina transición de fase. Por su posible papel en la enfermedad, las transiciones en las células vivas interesan cada vez más a los biólogos. Los fisicoquímicos llevan estudiando la separación de fases, como la condensación de las gotas de aceite en el agua, desde hace muchos años. El aceite y el agua son líquidos, pero permanecen separados debido al equilibrio entre las fuerzas de atracción y repulsión. La ventaja de la separación de fases para la célula viva es que concentra en un lugar un determinado conjunto de moléculas, lo que facilita ciertas actividades celulares. Por ejemplo, como se describió en un artículo de *Science* en 2018, varias proteínas se condensan cerca de un gen para controlar su expresión. Este grupo condensado no se difunde pese a permanecer en estado líquido, pues las fuerzas físicas débiles lo mantienen cohesionado en una gotícula. Semejante configuración permite que las proteínas se desplacen y actúen juntas sin que tengan que estar envueltas por una membrana, cuyo mantenimiento exigiría costosos recursos a la célula.

Algunas proteínas como la tau se apelmazan cuando forman parte de una gotícula y, con elevadas concentraciones, serían proclives a formar un ovillo. Las que crean ese tipo de gotículas comparten una propiedad conocida como desorden intrínseco. Al igual que el dios griego Proteo, adoptan numerosas formas, a diferencia de las proteínas más ordenadas, que se limitan a unas pocas. Formas diferentes requieren niveles de energía diferentes. En ocasiones, algunas de estas proteínas intrínsecamente desestructuradas se pliegan en un estado de energía tan bajo que no pueden salir de él, lo que por fuerza aumenta su rigidez. Y esto podría exacerbar su tendencia a enredarse unas con otras.

Las células acumulan proteínas y otras moléculas propensas a las transiciones de fase en orgánulos sin membrana, llamados gránulos de estrés y gránulos de ARN. Cuando ciertas proteínas o ARN forman tales gránulos, quedan comprimidos, por lo común sin perder el estado líquido. Pero si alcanzan una densidad dada, supuestamente tienden a aglomerarse y a pasar a la fase sólida, con lo que serían más nocivos para el cerebro y más recalcitrantes para los sistemas celulares de eliminación. En suma, es preciso conocer mejor las condiciones que desencadenan el proceso.

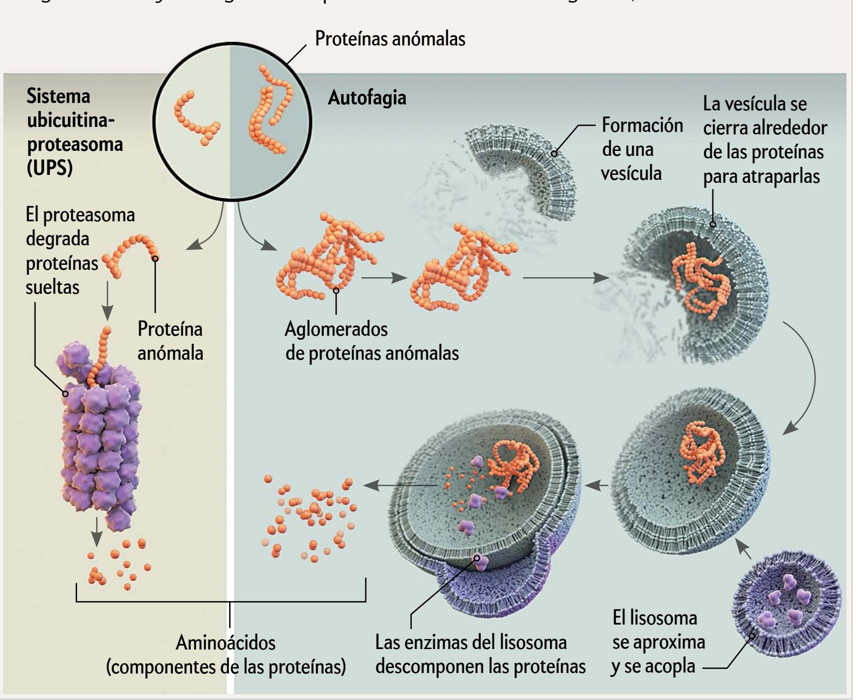
LA INFLUENCIA DE LOS GENES

El alzhéimer puede surgir en la mediana edad por mutaciones en tres genes (*APP*, *PSEN1* y *PSEN2*) que son los responsables de una rara variante familiar, sin duda una herencia terrible para las nuevas generaciones. Pero la inmensa mayoría de las veces aparece a partir de los 65 años, sin que intervengan dichos genes. Mediante el análisis de decenas de miles de genomas, los genetistas han descubierto

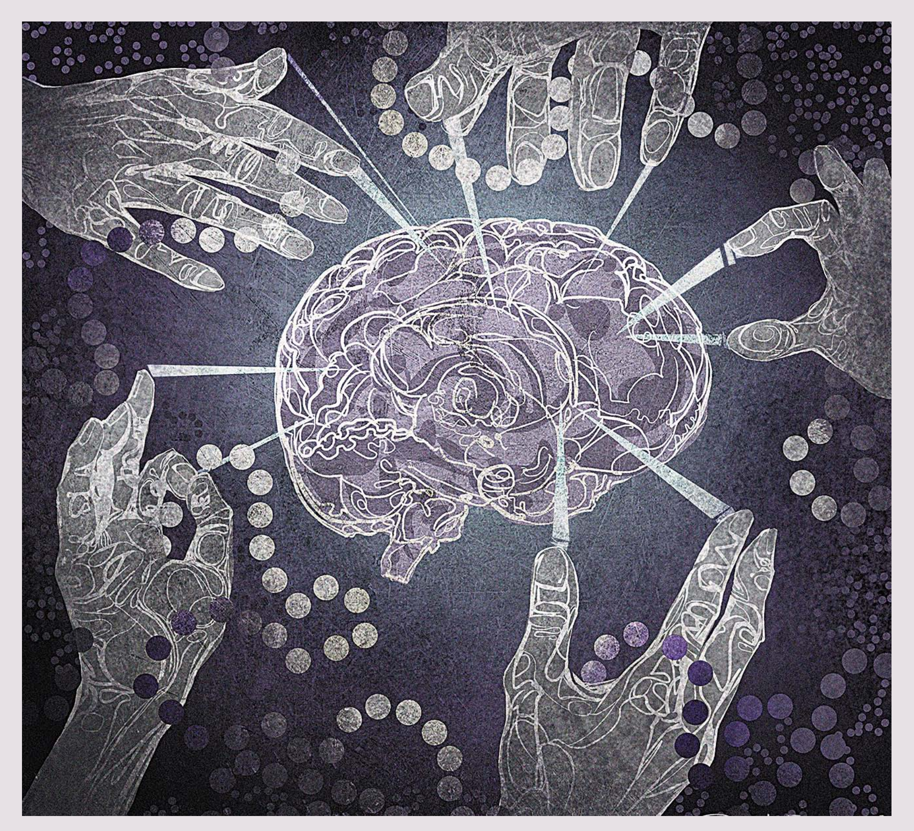
LA RAÍZ DEL PROBLEMA

La eliminación de las proteínas defectuosas

Los dos signos distintivos del alzhéimer son los aglomerados de un fragmento proteico llamado amiloide beta y los ovillos de proteína tau. Los sistemas neuronales encargados de deshacerse de las proteínas anómalas fallan, pero no se sabe dónde radica el problema. La célula sana cuenta con dos métodos de eliminación. Las pequeñas proteínas sueltas acaban en el sistema ubicuitina-proteasoma, dotado de un orgánulo con forma de barril (el proteasoma), que las trocea en aminoácidos. Los grupos grandes se tratan mediante autofagia, que consiste en el encapsulado de los aglomerados y su degradación por las enzimas de otro orgánulo, el lisosoma.



CAMPBELL MEDICAL ILLUSTRATION



EL CONFLICTO DE LOS FÁRMACOS ANTIAMILOIDEOS

Una de las piedras angulares del tratamiento contra el alzhéimer comienza a resquebrajarse

Tanya Lewis

En marzo de 2019, el gigante biotecnológico Biogen suspendió dos grandes ensayos de su medicamento experimental para el alzhéimer, el aducanumab, porque no parecía mejorar la memoria de los pacientes. Meses después, en un giro inesperado, la empresa y su socio, la farmacéutica japonesa Eisai, comunicaron su intención de solicitar la autorización de comercialización a la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. (FDA). Biogen explicó que un nuevo análisis había revelado beneficios en los participantes de un ensayo que habían recibido las dosis más altas del biofármaco, que disuelve los aglomerados de amiloide beta. Estos titubeos y los repetidos fracasos de otros muchos fármacos antiamiloideos dividen a los expertos sobre si impedir la acumulación de esta sustancia, que durante tanto tiempo ha sido considerada la mejor diana terapéutica del alzhéimer, sigue siendo una estrategia acertada.

Algunos de los que ponen en entredicho la hipótesis del amiloide son los mismos que la plantearon en su día. «Diría que tiene cimientos, pero hay que apuntalarla», opina John Hardy, uno de los autores de los estudios genéticos que dieron pie a ella hace más de dos décadas. Según este genetista, que dirige un programa de neurociencia molecular en el Instituto de Neurología del Colegio Universitario de Londres, «el [concepto] que esbozamos en 1998 peca de excesivamente simplista. Quedaban muchos interrogantes y pensábamos que se resolverían en un par de años. Y 20 años después siguen sin respuesta». En cambio, otros expertos aún sostienen que la hipótesis es una explicación convincente y que los tratamientos dirigidos contra la proteína van por el buen camino.

El amiloide beta se forma tras la fragmentación enzimática de la proteína precursora de amiloide (APP) por las secretasas β y γ. En condiciones normales, los fragmentos se descomponen aún más, pero en los enfermos de alzhéimer esta sustancia se acumula alrededor de las neuronas, en cuyo interior se forman ovillos de otra proteína, la tau. Puesto que estas alteraciones conducen a la larga a la muerte neuronal y a la degeneración cerebral, se señaló al amiloide beta como una de las causas. Además, los afectados por cierta forma hereditaria de alzhéimer presentan mutaciones en uno de los tres genes que codifican la APP y en dos componentes de la secretasa γ llamados presenilinas. Sus neuronas tienen dificultades para deshacerse del amiloide beta. Otros indicios se hallaron en personas con síndrome de Down, que nacen con una copia adicional del cromosoma 21 (portador del gen de la APP) y, por tanto, producen la proteína en mayor cantidad. Tienen también un alto riesgo de sufrir demencia a los 50 años. A la vista de estos descubrimientos, se dedujo que el fallo del mecanismo de eliminación del amiloide era el culpable de la enfermedad.

Pero los reiterados fracasos han llevado a algunos a replantear la eficacia de los tratamientos dirigidos exclusivamente contra esa diana. El amiloide beta suele acumularse durante años antes de que aparezcan los síntomas y su presencia no siempre es sinónimo de enfermedad. En febrero, dos fármacos antiamiloideos (el solanezumab de Eli Lilly y el gantenerumab de Roche) fracasaron en un ensayo clínico de una forma hereditaria precoz, que se cree directamente relacionada con el metabolismo del amiloide.

Un conjunto de investigaciones, entre las que se encuentra el trabajo del Estudio Colectivo sobre la Enfermedad de Alzheimer, financiado por el Instituto Nacional del Envejecimiento de EE.UU., indica que la acumulación de amiloide es solo una parte de la compleja cascada de interacciones. «Nuestras experiencias con diversos antiamiloideos nos han traído claramente a este punto», comenta Howard Feldman, director del estudio colectivo, llevado a cabo por un consorcio de laboratorios universitarios y de entidades públicas que realizan ensayos clínicos con tratamientos del alzhéimer. «Parece muy difícil que una sola intervención frente al amiloide vaya a detener la marea de la enfermedad.» Aunque la hipótesis sea una buena explicación para las formas hereditarias precoces, quizás en la forma tardía confluyan otras alteraciones, por lo que es poco probable que funcionen los métodos dirigidos solo al amiloide, asegura Feldman, neurólogo clínico y profesor de la Universidad de California en San Diego.

Algunos investigadores, como Karen Duff, de la Universidad de Columbia, defienden la idea de que los ovillos de tau desempeñan un papel tanto o más importante que el amiloide beta. Un motivo es que el grado de alteración de tau muestra mayor relación con la gravedad de los síntomas cognitivos que los trastornos amiloideos.

Otros piensan que la inflamación o las anomalías de la barrera hematoencefálica son fundamentales. Pero los fármacos dirigidos contra la tau y la inflamación han fraca-

sado igualmente hasta ahora, señala Feldman. Cree que lo mejor es optar por una combinación: «Puede que un solo tratamiento nunca sea suficiente, salvo en las formas hereditarias [precoces] de la enfermedad».

Se barajan otras ideas. En los últimos años, Hardy y sus colaboradores han llegado a la conclusión de que el alzhéimer tardío y otros trastornos neurodegenerativos son la consecuencia de una respuesta defectuosa al daño. Postulan que la acumulación inicial de amiloide beta alteraría la membrana neuronal, y que las células inmunitarias del sistema nervioso (la microglía) no lograrían eliminar las proteínas alteradas de la membrana, con lo que la neurona dejaría de eliminar más amiloide y se desencadenaría un ciclo lesivo. Recientes estudios de secuenciación del genoma respaldan esta idea, según Hardy: la mayoría de los genes catalogados como factores de riesgo del alzhéimer tardío intervienen en el metabolismo de la microglía; otros codifican proteínas que participan en la construcción y la reparación de la membrana celular.

Algunos autores siguen pensando que el papel del amiloide es primordial, ya que varios estudios vinculan su acumulación con la gravedad de los síntomas. «En mi opinión, la hipótesis está vivita y coleando», advierte David Holtzman, catedrático de neurología de la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington en St. Louis. «No hay duda de que la ciencia indica que el amiloide beta es importante. La pregunta es: ¿cuándo es conveniente actuar sobre él?». Aunque más escéptico que hace décadas, Hardy cree que la hipótesis se sustenta en datos sólidos y que los fármacos antiamiloideos tal vez den malos resultados porque se administran demasiado tarde. «Si estuviera sufriendo un ataque al corazón, una estatina podría haber sido el medicamento adecuado, pero ya sería tarde», aclara. En el futuro quizá sea posible medir biomarcadores genéticos del alzhéimer, en la sangre o en el líquido cefalorraquídeo, que permitan detectar a las personas en riesgo e iniciar el tratamiento antes de que surjan los síntomas.

Otros apuntan que la verdadera importancia del amiloide sería como biomarcador. «Pienso que es un indicador esencial de cara al riesgo y al diagnóstico precoz de la enfermedad. No creo que haya nada mejor en este momento», asevera Denise Park, catedrática de ciencias del comportamiento y del cerebro en la Universidad de Texas en Dallas, que estudia el envejecimiento cerebral.

Parece improbable que la hipótesis del amiloide se vaya a abandonar a corto plazo. Pero después de mucho tiempo los investigadores se muestran dispuestos a ampliar su perspectiva para abarcar otros procesos implicados en este «destructor de mentes y recuerdos».

Tanya Lewis es redactora de salud y medicina de Scientific American*.*

otras modificaciones del ADN, cerca de dos docenas de variantes génicas, que elevan ligeramente el riesgo. De ellas, la más influyente es una versión del gen *APOE* conocida como e4. La suma de diversas variantes de riesgo incrementa la probabilidad de padecer la enfermedad. (Como las variantes génicas suelen ir asociadas al origen étnico, si se quiere evaluar con fiabilidad el riesgo genético en todas las poblaciones será indispensable recabar muchos más datos, pues los disponibles proceden casi por entero de la población blanca.)

Cada variante abre una puerta distinta al estudio de cómo un pequeño cambio en el genoma aumenta la probabilidad de sufrir alzhéimer. Algunas de las más frecuentes y, por tanto, las más interesantes, son genes u otros tramos de ADN de la microglía. En un artículo de *Science* de 2019 sobre estas células inmunitarias, se dio a conocer una variante vinculada al riesgo en el gen *BIN1*. En condiciones normales, este gen interviene en el mecanismo que engulle las moléculas potencialmente nocivas para las neuronas vecinas. La variante afecta a la eficacia con que los microgliocitos fagocitan las proteínas errantes.

En la microglía y en otras células, ciertas variantes génicas también se asocian a la edad y el sexo. Varones y mujeres muestran diferencias, tanto en genes de los 22 pares de cromosomas somáticos como en genes de los cromosomas sexuales X e Y. Los efectos de esas variantes podrían guardar relación con la mayor incidencia del alzhéimer en el sexo femenino, que persiste aún después de tener en cuenta la esperanza de vida más prolongada de las mujeres [*véase* «El nexo entre la menopausia y el alzhéimer», en la página 27]. Es probable que los pequeños efectos de cada variante génica ligada al alzhéimer contribuyan en conjunto al modo en que cada persona controla las acumulaciones de amiloide y tau. Urge determinar con precisión el cómo y el porqué de esas contribuciones.

MODERAR LA INFLAMACIÓN

Cuando el cerebro detecta un elemento nocivo, como las placas de amiloide o los ovillos neurofibrilares de tau, emite una alerta y libera un aluvión de moléculas del sistema inmunitario llamadas citocinas, junto con diversas células defensivas. Esta respuesta proviene, en gran parte, de la microglía y desata una reacción inflamatoria cuyo objetivo es destruir los focos dañinos. La e fuerza bruta de este sistema «innato» contrasta con la selectividad del sistema «adaptativo». Este moviliza células defensivas y anticuerpos que montan una defensa más proporcionada y precisa, pues solo reaccionan ante ciertos intrusos, como bacterias o virus. En el alzhéimer predomina la respuesta innata, de carácter inespecífico. Cuando la proliferación de las lesiones sobrepasa la capacidad de la maquinaria interna de la neurona para deshacerse de los desechos, se activa la respuesta inflamatoria general que, por desgracia, a menudo ataca a células sanas del cerebro. Científicos de la Universidad de California en Irvine han descubierto recientemente que si eliminan los microgliocitos envejecidos en el cerebro de ratones viejos, este se repuebla con otros nuevos. Este rejuvenecimiento mejoró la memoria espacial, revirtió las alteraciones seniles de la expresión de genes neuronales y aumentó la formación de nuevas neuronas, así como la densidad de sus dendritas. Los daños desatados por el amiloide y la tau probablemente se sumen a una leve inflamación cerebral que el envejecimiento trae consigo de modo natural. La concentración de citocinas proinflamatorias, como el factor de necrosis tumoral (TNF), es mayor en muchas personas de edad avanzada, lo que denota la existencia de un ligero estado inflamatorio que afecta a todo el organismo en ese momento de la vida. El envejecimiento es muy variable en los seres humanos y, por consiguiente, la evolución y los efectos del alzhéimer también lo son. Parte de esta diversidad tal vez se deba a la variación individual del sistema inmunitario. Cada persona hereda distintas configuraciones de los genes que intervienen en las respuestas inmunitarias. Además, las influencias ambientales modelan el sistema a lo largo de la vida. Por ejemplo, la composición de la microflora simbiótica en órganos como el intestino y los microbios patógenos del entorno a los que queda expuesto. Todo ello permite suponer que la exposición del sistema inmunitario a los patógenos, así como las diferencias genéticas, influyen en el modo en que se presenta el alzhéimer por cuanto modelizan un perfil inmunitario individual o «inmunotipo».

El reto para quienes buscan detener el daño cerebral causado por la inflamación generalizada estriba en distinguir las respuestas inmunitarias deseables, con las que el cerebro combate los problemas esporádicos y la degradación



normal propia del envejecimiento, de las otras respuestas, más toscas, contra los trastornos progresivos del alzhéimer. Se pretende controlar la inflamación cerebral causada por la enfermedad, pero aún no se sabe cómo administrar un tratamiento con la debida precisión.

DESCONEXIONES ELÉCTRICAS

El cerebro es un órgano eléctrico: su atributo definitorio es la capacidad para codificar y transmitir información en forma de señales eléctricas de una neurona a otra, generalmente por medio de sustancias llamadas neurotransmisores.

Aún no se ha estudiado lo suficiente cómo altera el alzhéimer la transmisión de las señales neuronales y las conexiones que conforman los circuitos funcionales de la memoria. Pero por fin podemos detectar las conexiones estructurales y funcionales, gracias a los avances técnicos que permiten visualizar esos enlaces con exquisito detalle.

Entre tales adelantos destaca la optogenética, con la que es posible estimular neuronas específicas del cerebro animal con luz. Se ofrece una recompensa o se infunde miedo al animal para, a continuación, detectar los genes que devienen más activos. En lo que supone un logro impresionante, con este método es posible observar y manipular neuronas concretas que codifican una memoria específica conocida como engrama, tal como se describe en un artículo de *Science* publicado este año. Al estimular esas células con luz después de la experiencia inicial, se evoca su recuerdo. Si conseguimos desentrañar el proceso biológico por el que se generan estas conexiones eléctricas de memoria, estaremos en condiciones de entender cómo se interrumpen esos circuitos neuronales en el alzhéimer.

Otro avance de este año es el descubrimiento de que la microglía intervendría en el olvido de los engramas al eliminar las sinapsis entre las neuronas.

También sabemos que los neurotransmisores son afectados de distintas maneras por algunas de las proteínas que participan en la patogenia del alzhéimer. La Tau se acumula en las neuronas que emplean el glutamato como neurotransmisor, implicadas en la emisión de señales. En cambio, otras neuronas inhibidoras de señales (cuya transmisión depende de unos buenos mecanismos de inicio y detención) liberan GABA como neurotransmisor y no resultan tan afectadas por la acumulación de tau. Queda pendiente de saber el fundamento de esta selectividad celular y sus consecuencias. También se ha constatado que la actividad neuronal fomenta la propagación de la tau, lo que quizá sea otra pieza clave del rompecabezas.

Los efectos del alzhéimer no solo parecen diferir en virtud del tipo de neurona transmisora, sino también de la zona del encéfalo. Por ejemplo, el daño es máximo en las áreas vinculadas a la memoria, las emociones y el sueño, mientras que los centros ligados a la función sensitivomotora primaria permanecen relativamente indemnes. Un estudio reveló que las regiones que permanecen activas cuando la mente divaga, el llamado estado predeterminado (*default*) o de reposo, corresponden a los lugares donde empiezan a asentarse las placas de amiloide. No conviene sacar conclusiones precipitadas: la divagación no causa necesariamente depósitos de este péptido.

Otro estado eléctrico del cerebro cada vez más reconocido como un factor relevante es el sueño. Los niveles de amiloide y tau fluctúan durante el ciclo normal de sueño y vigilia, y la privación de sueño dispara la producción de amiloide y disminuye su eliminación. El sueño profundo desata ondas rítmicas del líquido cefalorraquídeo, que tal vez sirvan para evacuar toxinas del cerebro, como el amiloide. Lo malo es que este tipo de sueño disminuye con el envejecimiento. Aun así, esta observación invita a plantear enfoques farmacológicos que restablezcan el sueño profundo.

COMPARTIR IDEAS

Estas áreas de investigación no componen un nuevo plan hermético e inamovible para el alzhéimer. Sin duda hay más. Pero estas cinco vías están enlazadas y, como la misma biología, su investigación fomentará el intercambio. Tengo la esperanza de que, a medida que la ciencia básica llene las lagunas, sobre todo las cuantitativas, otros propongan las teorías y los modelos computacionales que permitan predecir los efectos del alzhéimer sobre los circuitos cerebrales y las vías celulares. Espero que estas líneas de investigación impulsen a pensar de manera colectiva y sistemática y a compartir ideas constructivas. Así unidos, podremos dejar atrás nuestra ignorancia sobre este terrible mal. IyC

PARA SABER MÁS

Proinflammatory cytokines, aging, and age-related diseases. M. Michaud et al. en *Journal of the American Medical Directors Association*, vol. 14, n.º 12, págs. 877–882, diciembre de 2013.
Cryo-EM structures of tau filaments from Alzheimer's disease. A.W.P. Fitzpatrick et al. en *Nature*, vol. 547, págs. 185–190, 17 de julio de 2017.
Memory engrams: Recalling the past and imagining the future. Sheena A. Josselyn y Susumu Tonegawa en *Science*, vol. 367, art. nº. eaaw4325, 3 de enero de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Conjurar la maldición del alzhéimer. Gary Stix en *IyC*, julio de 2015.
Un éxito excepcional contra el alzhéimer. Miia Kivipelto y Krister Håkansson en *IyC*, junio de 2017.



Jena Pincott, bióloga de formación, escribe sobre ciencia. Ha publicado varios libros, como *Do chocolate lovers have sweeter babies?: The surprising science of pregnancy* (Simon & Schuster, 2011). Ha colaborado con *The Wall Street Journal*, Oprah.com, *Psychology Today* y *Nautilus*, entre otros medios.

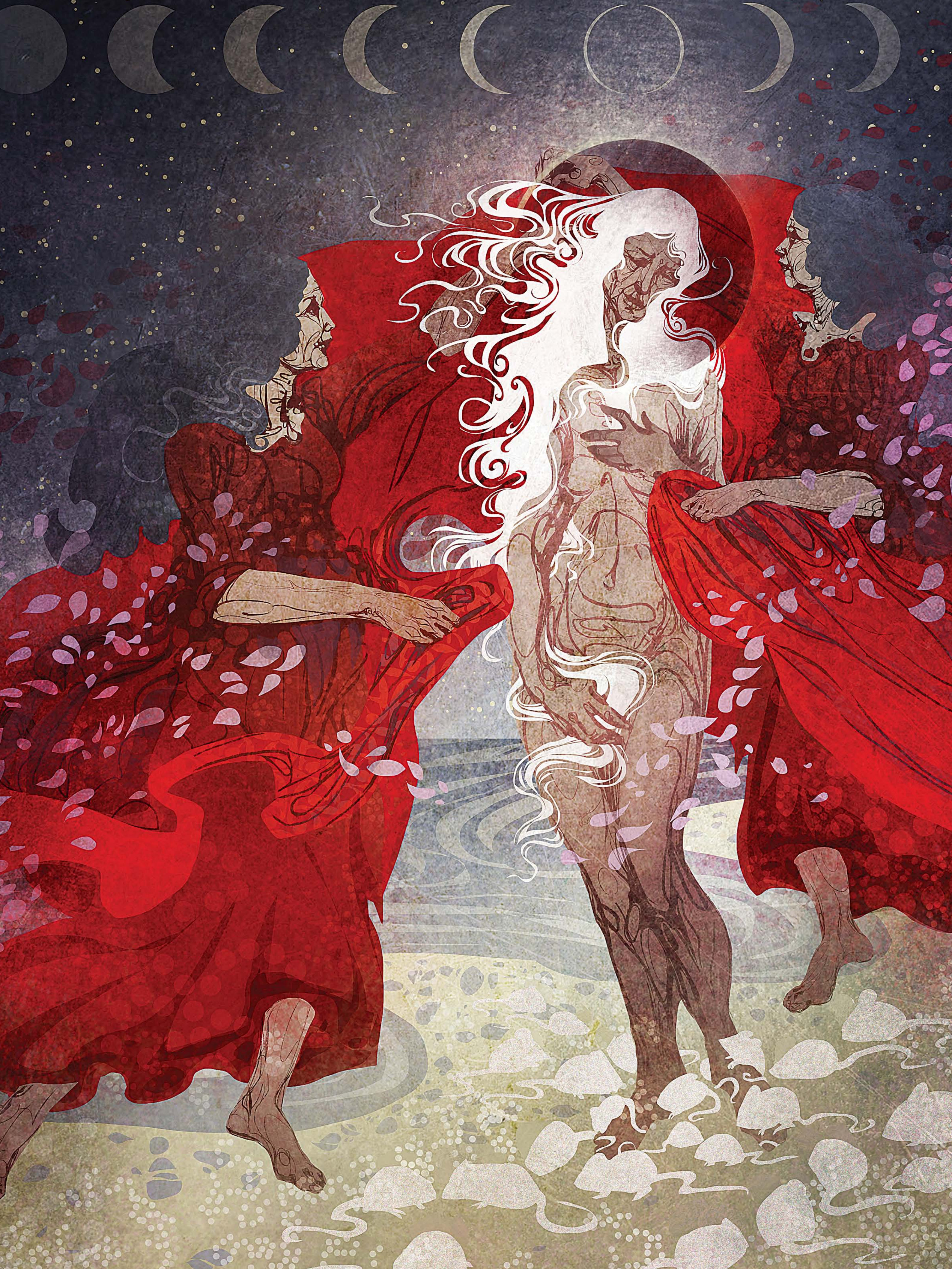
EL NEXO ENTRE LA MENOPAUSIA Y EL ALZHÉIMER

Envejecer es el principal factor de riesgo de padecer la enfermedad. Todo indica que, por un estrecho margen, ser mujer es el segundo. ¿Por qué?

Jena Pincott

Así comienza la pérdida de memoria, según el testimonio de Sophie: un buen día te presentas en el despacho cuando a esa hora tenías un almuerzo de trabajo con un cliente. No recuerdas los nombres de los vecinos. Pronto te hallas en una habitación sin saber por qué has ido hasta allí. Sophie, seudónimo de esta abogada que ha pasado el umbral de los 50, viene sufriendo frecuentes sofocos y sudores nocturnos, ambos síntomas propios de la menopausia, pero los olvidos parecían ser harina de otro costal. ¿Qué le estaba ocurriendo a su cabeza?

Lisa Mosconi, directora de la Iniciativa por el Cerebro Femenino (*Women's Brain Initiative*) y directora adjunta del Centro para la Prevención del Alzhéimer en la Facultad de Medicina Weill Cornell, en Nueva York, tal vez lo sepa. Ha analizado miles de imágenes obtenidas mediante tomografía de emisión de positrones en pacientes que están iniciando la menopausia y ha visto la variación del metabolismo cerebral con el paso del tiempo. «Antes de la menopausia, el cerebro quema energía a raudales», me explica mientras me enseña una imagen perteneciente al cerebro de una joven. Lucen multitud de manchas de colores vivos rojo y naranja, que representan un metabolismo acelerado de la glucosa, un indicador indirecto de la actividad neuronal. En la perimenopausia, que afecta a la mujer a mitad o a finales de los cuarenta, el metabolismo de la glucosa se ralentiza entre un 10 y 15 por ciento, o más, y aparecen cambios en las imágenes: los puntos rojos y naranjas ceden paso a una paleta en la que abundan los tonos amarillos y verdes, indicadores de una captación de glúcidos más reducida y un metabolismo más lento. Y con la última imagen me indica: «A continuación, en la posmenopausia, el metabolismo de la glu-



cosa sigue ralentizándose hasta un 20 o 30 por ciento, a veces más». De forma clara, se observa un predominio de los verdes.

Los estrógenos son los principales reguladores del metabolismo en el cerebro joven femenino, en el que orquestan múltiples aspectos, desde el transporte y la absorción de la glucosa hasta su descomposición para obtener energía. Las imágenes de Mosconi constituyen la colorida prueba de que el descenso de los niveles de estas hormonas en la menopausia, que suele comenzar entre los 45 y 55 años, deviene en una «crisis bioenergética para el cerebro», como la describe. En algún momento de ese período de transición de más de siete años, hasta el 60 por ciento de las mujeres sufre lo que se conoce como deterioro cognitivo de la menopausia: brotes de confusión, distracción y olvido. Son problemas de memoria normales. La creación de las sinapsis requiere energía, y como los niveles de estrógenos y el metabolismo de la glucosa disminuyen, también lo hace la formación de conexiones nuevas entre las neuronas.

Por suerte, la alteración es pasajera: las afectadas recuperan su agudeza intacta, pues el cerebro suple la carencia con otras fuentes de energía. En un estudio de 2009 se comprobó que las mujeres que acababan de superar la menopausia obtenían tan buenos resultados en las pruebas cognitivas como antes de iniciarla. Sin embargo, al cabo de unas décadas, a una quinta parte de ellas se les diagnosticará la enfermedad de Alzheimer. Mosconi y otros especialistas creen que para las más de 3,6 millones de mujeres que solo en EE.UU. están afectadas por la enfermedad [en España, más de 580.000], la menopausia pudo ser un momento crítico para el deterioro cognitivo.

¿Por qué las portadoras del gen *APOE4*, que aumenta el riesgo de alzhéimer, tienden a sufrir antes la enfermedad que los hombres portadores?

Aunque la investigación del alzhéimer en la mujer se ha convertido en una prioridad, persisten demasiadas incógnitas en lo tocante a los factores de riesgo y los síntomas netamente femeninos, así como a la prevención y las respuestas al tratamiento. ¿Por qué una mujer de EE.UU. tiene una probabilidad de una entre cinco de sufrir la enfermedad al cumplir los 65 años, en comparación con una entre nueve de un hombre de igual edad? Las mujeres de ese país viven en promedio cinco años más que los varones, pero la «longevidad no explica enteramente que la frecuencia y el riesgo de por vida sean más elevados», según destacó un comité de expertos de la Sociedad para la Investigación de la Salud Femenina en un análisis de 2018. ¿Por qué las portadoras de la variante e4 del gen *APOE* (*APOE4*), que aumenta el riesgo de alzhéimer, tienden a presentar la enfermedad antes que los portadores masculinos? ¿Qué aspectos de la biología y la experiencia vital las hace más vulnerables?

La hipótesis de la menopausia (que el descenso de los estrógenos en ese período deja el cerebro más indefenso al daño futuro) podría brindar respuestas. Si Mosconi y otros especialistas están en lo cierto, Sophie y los millones de mujeres de todo el mundo que están atravesando esa etapa de transición podrían beneficiarse de intervenciones en los hábitos y, posiblemente, de la controvertida hormonoterapia como medios para prevenir la enfermedad.

PENSAR CON MENOS ESTRÓGENOS

El cerebro entra en «un modo de depauperación», afirma Roberta Díaz Brinton, directora del Centro de Innovación en Neurociencia de la Universidad de Arizona, al describir lo que sucede cuando los estrógenos disminuyen y las manchas verdes comienzan a predominar en las imágenes de tomografía de las mujeres menopáusicas. Estas hormonas desempeñan amplias y variadas funciones en la bioenergética del cerebro, me explica. Como moléculas mensajeras que son, disponen de receptores esparcidos por todo el órgano, lo que les permite regular las mitocondrias, que generan la energía de la célula e impulsan la formación de las conexiones neuronales. Los estrógenos activan también las enzimas que hacen funcionar las sinapsis, y facilitan el transporte de la glucosa desde los vasos sanguíneos hasta el cerebro y, una vez allí, hasta las neuronas y la glía (las células que prestan soporte y protección a las neuronas).

Los trabajos de Brinton con hembras de ratón viejas han demostrado que, a medida que los estrógenos disminuyen y el metabolismo de la glucosa se enlentece, el cerebro suple esa carencia adoptando como fuente complementaria de energía los cuerpos cetónicos. Estos derivan de los ácidos grasos, en este caso de la sustancia blanca, la cual conforma las vainas de mielina que envuelven las neuronas. Esa transición, en esencia un acto de canibalismo con uno mismo, parece que también se produce hasta cierto punto en las mujeres, pero aquellas cuyo cerebro pasa a depender en exceso de los cuerpos cetónicos corren el riesgo de sufrir una degeneración más acusada de la sustancia blanca y, por ende, de demencia.

A veces la escasez de fuentes de energía en el cerebro coincide con la aparición de depósitos o placas de la proteína amiloide beta. Estas surgen a veces en personas cuyo cerebro es normal, pero siempre están presentes en todos los enfermos con alzhéimer. Se cree que interfieren con la transmisión sináptica. En el cerebro enfermo, el amiloide beta suele manifestarse en conjunción con la tau, una proteína enmarañada que se enrolla alrededor del núcleo de las neuronas y que al parecer las mata al impedir el transporte de nutrientes. Además, el descenso de los estrógenos aumenta la permeabilidad de la barrera hematoencefálica, lo cual expondría el cerebro a toxinas o infecciones capaces de desencadenar una respuesta inmunitaria intensa, en la que se liberarían proteínas que actuarían como germen de nuevas placas y ovillos.

En contraste con el cerebro de las mujeres de 40 o 50 años, explica Mosconi, el de los hombres de edades similares no parece envejecer notablemente, pues acumula menos placas de amiloide beta. Una explicación radica en que, a semejanza de los estrógenos, la testosterona es neuroprotectora, y en la andropausia nunca desciende de forma tan acusada ni súbita como los estrógenos femeninos. Esta diferencia contribuiría a explicar por qué son menos los varones que padecen la enfermedad. La patología del alzhéimer también puede surgir antes en las mujeres que en los hombres, explica Mosconi, pero la compensan tan bien que a menudo no son diagnosticadas hasta que la enfermedad se halla avanzada. En 2019, un estudio comprobó que las mujeres cuyas imágenes de tomogragía mostraban biomarcadores del alzhéimer superaban a sus homólogos masculinos en las pruebas de memoria verbal. Si los valores límite fueran específicos de cada sexo, la enfermedad podría diagnosticarse antes, cuando la intervención es más eficaz.

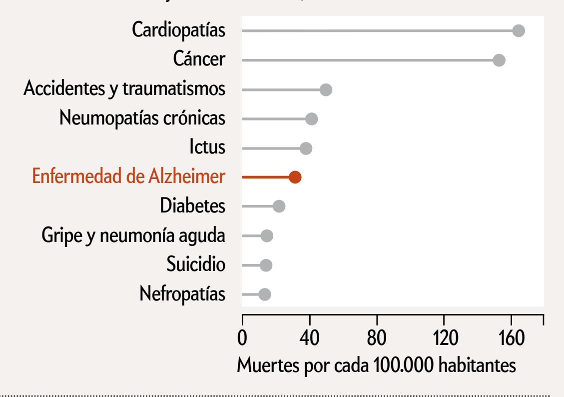
LA DEMENCIA EN CIFRAS

La carga del alzhéimer

Mortalidad

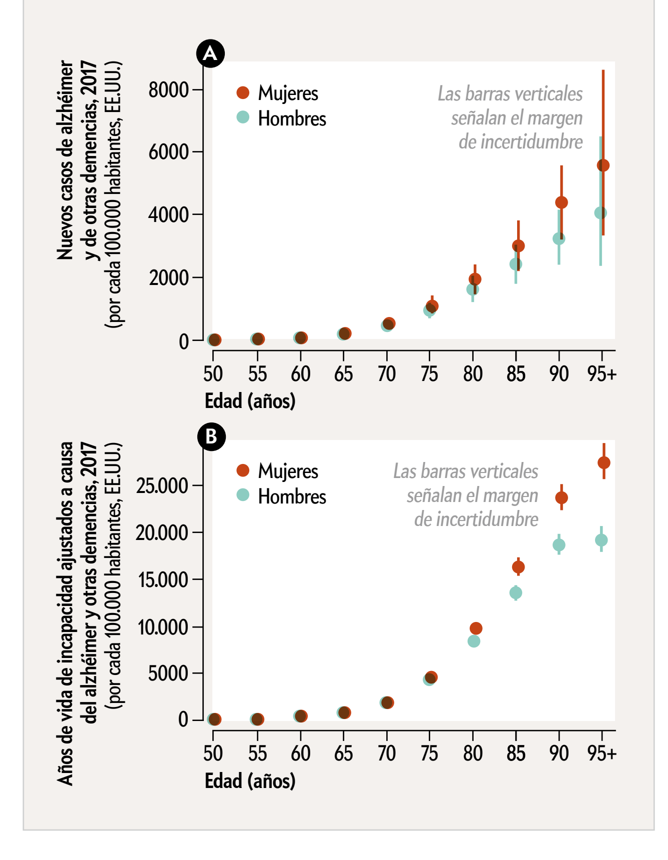
La enfermedad de Alzheimer es la sexta causa de muerte en EE.UU. y los expertos señalan que su incidencia real podría ser mayor, pues en los certificados de defunción suele consignarse la causa inmediata, como una neumonía, pero no la demencia del difunto.

Las 10 primeras causas de muerte en EE.UU., 2017
(índices de mortalidad ajustados a la edad)



Diferencias entre sexos

Las estadounidenses sufren el alzhéimer con más frecuencia que los varones, según los cálculos del Instituto de Evaluación y Métrica Sanitaria. Desde los 50 hasta los 95 años aumenta el número de mujeres diagnosticadas **A**. Y cuando la enfermedad se mide en virtud de los años perdidos por incapacidad o por muerte prematura (respecto a la esperanza de vida general), surge una brecha creciente similar entre ambos sexos **B**.



Con el objetivo de mejorar la detección de las mujeres en riesgo, se han comenzado a investigar los vínculos entre el alzhéimer y la exposición a los estrógenos a lo largo de la vida. Esta se mide en términos del «período reproductor»: el lapso que media entre la primera menstruación y la última. Un estudio a gran escala con 15.754 miembros del consorcio sanitario Kaiser Permanente halló que las mujeres cuyo período reproductor era de 21 a 34 años presentaban una probabilidad un 26 por ciento mayor de padecer demencia que aquellas cuyo período era de 39 a 44 años, lo cual indica que el retraso en la menarquía o la menopausia precoz entrañan un riesgo mayor. Pese a la multitud de factores que influyen en la exposición a los estrógenos durante la vida de la mujer, su repercusión ha sido poco estudiada. Así, por ejemplo, durante la gestación tiene lugar una elevación drástica de estas hormonas, que tras el parto se desploman y permanecen varios años por debajo de los niveles observados en las mujeres que nunca han estado embarazadas. En cambio, los estudios que indagan en la posible relación entre el número de partos con el riesgo de padecer alzhéimer arrojan conclusiones contradictorias. Más de 100 millones de mujeres toman píldoras anticonceptivas que suprimen las hormonas ováricas, pero sorprendentemente no sabemos gran cosa de sus efectos a largo plazo sobre el riesgo de demencia.

EL DILEMA DE LA HORMONOTERAPIA

Sophie, que tomó la píldora desde la pubertad y que no ha sido madre, afirma que su pérdida de memoria se agravó el último año de la perimenopausia. A menudo sufría más de tres sofocos por hora, una frecuencia que se asocia a una mayor alteración del metabolismo de la glucosa en el cerebro, una pérdida acelerada de la sustancia blanca y un alto riesgo de demencia en el futuro. La doctora de Sophie le recetó una nueva píldora: un comprimido que combina estrógenos con progestágenos (estos protegen el útero). Según Sophie, el efecto resultó «verdaderamente milagroso»: los sofocos se esfumaron y volvió a recordar las reuniones de almuerzo.

Da la impresión de que, solo por razones de salud mental, cualquier mujer menopáusica debería recibir la hormonoterapia, pero la realidad es más sutil. A inicios de la primera década de este siglo, el Instituto Nacional del Corazón, los Pulmones y la Sangre de EE.UU. presentó los resultados de su multitudinario estudio Iniciativa por la Salud Femenina, así como de un estudio complementario sobre la memoria, en los que revelaba que la hormonoterapia, normalmente a base de estrógenos más un progestágeno, estaba vinculada con un aumento del riesgo de cáncer de mama, ictus, cardiopatía y coagulopatía y, en impactante contradicción con todas las expectativas, con una incidencia doble de demencias. Desde entonces se han descubierto defectos en el estudio. A las participantes se les prescribieron estrógenos equinos conjugados, una forma semisintética cuyo efecto neuroprotector no sería tan elevado como el del 17β-estradiol, de uso corriente hoy. Otro problema aún mayor era que las mujeres tenían al menos 65 años cuando comenzaron la hormonoterapia.

La edad en que se toma la primera pastilla de hormonoterapia (o se aplica la primera crema o se coloca el anillo o parche) es primordial para lo que Brinton describe como el «sesgo de las células sanas en la acción de los estrógenos». Si las neuronas están sanas, responden a los estrógenos. Si están envejecidas o permanecen privadas de ellos demasiado tiempo, dejan de responder a estas hormonas porque las vías de señalización se deterioran y el funcionamiento de los receptores queda alterado. En tal situación, añadir los estrógenos podría incluso agravar

FUENTES: «MORTALITY IN THE UNITED STATES, 2017», SHERRY L. MURPHY ET AL. NATIONAL CENTER FOR HEALTH STATISTICS DATA BRIEF, N.º 328, NOVIEMBRE DE 2018 (*principales causas de muerte*); GLOBAL BURDEN OF DISEASE COLLABORATIVE NETWORK—GLOBAL BURDEN OF DISEASE STUDY 2017 (GBD 2017) POPULATION AND FERTILITY 1950–2017. INSTITUTO DE EVALUACIÓN Y MÉTRICA SANITARIA DE EE.UU., 2018 (*diferencias entre sexos*); JEN CHRISTIANSEN (*gráficas*)

la neurodegeneración. Así que para que la hormonoterapia sea beneficiosa y no perjudicial, debe dar comienzo en el intervalo crítico, normalmente en los cinco años siguientes a la última menstruación, aclara Brinton.

Varios estudios observacionales han intentado comprobar la hipótesis del intervalo crítico en pacientes que habían tomado la hormonoterapia por lo menos durante 10 años y han obtenido una variopinta gama de resultados: desde una reducción del 30 por ciento en el riesgo de alzhéimer, en un estudio de Utah en el que el tratamiento se inició en los cinco años posteriores al inicio de la menopausia, hasta un aumento de entre el 9 y 17 por ciento en dicho riesgo, en un reciente estudio finés en el que la edad de inicio no pareció influir en el riesgo. ¿A qué resultados debemos dar crédito? Los expertos no lo saben. Si bien consideran que la hormonoterapia resulta segura y eficaz para muchas mujeres que inician la menopausia, persiste la falta de acuerdo sobre la protección contra la demencia, que se complica por diversos factores. Mosconi reclama «más estudios clínicos, sobre todo con mujeres que inicien la hormonoterapia cuando aún estén en la perimenopausia». Las afectadas por síntomas perimenopáusicos intensos, como Sophie, podrían no adaptarse de forma natural a la pérdida de los estrógenos; en ellas, el tratamiento hormonal tal vez impediría los daños neurodegenerativos durante la transición a la menopausia.

«No me atrevo a abandonarla», afirma Sophie de su hormonoterapia. Cree que la ha salvado de un círculo vicioso de pérdida de memoria que la habría dejado como su abuela, una encantadora mujer de carácter fuerte a la que el alzhéimer volvió confusa y desconfiada. Sophie no se ha hecho la prueba del gen *APOE4*, y no está claro que si lo tuviera acabase sufriendo la enfermedad; tampoco ningún estudio ha confirmado si la hormonoterapia ayuda a evitarla. Aun así, me insta a mí, una cuarentona: «Tienes que comenzar con ella en cuanto la necesites.» ¿Seguro que no hay un modo mejor de prevenir el alzhéimer?

EL INTERVALO DE VULNERABILIDAD

La menopausia no provoca el alzhéimer. Es más bien un intervalo de vulnerabilidad, sobre todo en las mujeres que presentan factores de riesgo, matiza Brinton. A primera vista, su vínculo con la enfermedad no salta a la vista. La media de edad de la menopausia se sitúa en los 51 años; el diagnóstico del alzhéimer tiene lugar de media entre los 70 y 75. Las separa, pues, un lapso de 20 años. Pero la llamada fase prodrómica (entre la patología inicial, como las placas de amiloide beta, y el deterioro cognitivo franco) también ronda los 20 años. «No creo que sea una coincidencia», opina Brinton.

Aparte de las tomografías y resonancias cerebrales, ¿es posible predecir el riesgo de alzhéimer antes, cuando aún se está sana? En un estudio publicado en 2016, Brinton y sus colaboradores clasificaron a 500 mujeres posmenopáusicas sanas en tres grupos: las que gozaban de un metabolismo óptimo, las que presentaban una presión arterial rayana en la hipertensión y, por último, aquellas con una salud metabólica en el límite de la normalidad. Solo este último grupo tuvo una puntuación sensiblemente baja en las pruebas de memoria verbal.

Técnicamente, los parámetros metabólicos de estas últimas participantes aún se hallaban dentro del intervalo normal, pero algunos indicios apuntaban a que su salud iba en la mala dirección. El primero era que los valores de la glucemia del grupo bordeaban la prediabetes, un trastorno que afecta a cerca del 30 por ciento de las mujeres y aparece vinculado de por sí con el deterioro cognitivo. Después de las comidas, la hormona insulina facilita la entrada de la glucosa en las células (que estas emplean como fuente de energía), pero en las personas con prediabetes, las células comienzan a resistirse a la acción de la hormona. Cuando las células cerebrales se vuelven resistentes a la insulina, absorben la glucosa pero no responden a ella, lo que sumado a la ralentización del metabolismo glucídico que comporta la menopausia contribuye a la neurodegeneración. Para muchas mujeres que se encuentran en esa fase de transición, la prediabetes es la antesala de la diabetes de tipo 2, que casi duplica el riesgo de sufrir alzhéimer. Más del 80 por ciento de los pacientes con alzhéimer presentan resistencia a la insulina.

Si pensamos en la menopausia (y en la disminución de los estrógenos) como una fase en la que se altera la homeostasia de todo el cuerpo, es fácil entender cómo una compleja serie de factores puede dar lugar al alzhéimer y por qué el control de esos factores resulta primordial de cara a la prevención. Entre los efectos positivos de los estrógenos sobre el sistema cardiovascular destacan la regulación del colesterol: elevan los niveles del colesterol «bueno», el de las lipoproteínas de alta densidad (HDL), y reducen los del «malo», el de las lipoproteínas de baja densidad (LDL), que provoca la acumulación de depósitos grasos en las arterias. El gen *APOE* interviene en el metabolismo del colesterol y se encarga de su transporte a las neuronas; los portadores de la variante e4 del gen presentan de forma natural concentraciones elevadas del colesterol de las LDL en la sangre, lo que va acompañado de un endurecimiento de las arterias. La inflamación fragmenta las placas y los pedazos desprendidos causan «ictus asintomáticos» que duplican con creces el riesgo de padecer alzhéimer y otros tipos de demencia.

Las mujeres afectadas por síntomas perimenopáusicos intensos podrían no adaptarse de forma natural a la pérdida de los estrógenos

El sueño también desempeña una función importante en la regulación del metabolismo, incluida la sensibilidad a la insulina, y dormir mal afecta de forma desmesurada a las mujeres, sobre todo durante la menopausia. En una noche normal de reposo, las células gliales depuran las proteínas amiloide beta y tau. La privación del sueño interrumpe el proceso, de modo que las proteínas se acumulan y aparecen las placas, lo que provoca la fragmentación del sueño; esta altera el metabolismo de la glucosa, que a su vez interfiere con el sueño, creándose un peligroso círculo vicioso que acelera los procesos neurodegenerativos. De nuevo, la variante *APOE4* agrava el riesgo: las personas que la poseen presentan una menor capacidad para eliminar o degradar las placas y los ovillos.

El estrés es también otro actor que puede desplazar el punto crítico durante la menopausia. Un estudio longitudinal de 35 años halló que cuantos más factores estresantes afectaban como mínimo un mes a mujeres en sus 40 y 50 años, más probabilidades tenían de padecer alzhéimer al cabo de cuatro décadas. Además del estrés, la mujer es víctima más frecuente de la depresión, un trastorno que casi duplica el riesgo de demencia.

No resulta sorprendente que las portadoras del *APOE4*, que, de nuevo, presentan el riesgo genético más claro de alzhéimer, sean cuatro veces más proclives a la depresión sintomática que las no portadoras, posiblemente a causa del aumento de las placas de amiloide beta en las regiones del cerebro implicadas en el control de las emociones.

UN MARGEN DE OPORTUNIDAD

En 2019, Brinton y sus colaboradores publicaron una extensión de su estudio sobre los indicadores metabólicos, esta vez incorporando como variable nueva el tipo de *APOE*. Las personas portadoras de una sola copia del gen *APOE4*, presente en torno al 25 por ciento de la población de Estados Unidos, tienen más probabilidades de padecer alzhéimer que otras y representan en torno al 40 por ciento de todos los casos. Las mujeres manifiestan la enfermedad mucho antes que los varones, entre los 65 y los 75 años, posiblemente debido a la pérdida de los efectos neuroprotectores de los estrógenos. Los portadores presentan más colesterol de las LDL, más placas de amiloide beta y de ovillos tau y una mayor disminución del volumen del hipocampo y de la conectividad cerebral con respecto a los no portadores. Durante el declive menopáusico del metabolismo de la glucosa en el cerebro, las portadoras del alelo e4 podrían recurrir más veces a los cuerpos cetónicos cerebrales como combustible auxiliar.

Como en el estudio precedente de Brinton, el grupo en riesgo por una salud metabólica deficiente presentó puntuaciones bajas en algunas pruebas cognitivas. Pero esta vez el análisis reveló que los portadores del *APOE4* eran los principales responsables de los malos resultados del grupo. Entre los portadores, el colesterol alto y otros efectos de la salud metabólica deficiente exacerbaron los efectos negativos del *APOE4*, lo que llevó a un deterioro cognitivo precoz. Ahora bien, cuando las portadoras del grupo con malos resultados recibieron la hormonoterapia, su salud metabólica mejoró, junto con la puntuación en ciertas pruebas cognitivas.

A pesar de ello, Brinton ve el gen *APOE4* como «un toque de atención, no como una sentencia de muerte»: muchísimas mujeres tienen esta variante y no padecen la enfermedad. En su estudio, el grupo con una salud metabólica óptima, que tuvo las mejores puntuaciones en las pruebas cognitivas, incluía portadoras del gen del alzhéimer. ¿Compensaron mejor esas mujeres, junto con las no portadoras sanas, la «crisis bioenergética» de la menopausia? ¿Compensó su buen estado general los demás factores de riesgo?

Al menos un tercio de los casos de alzhéimer están vinculados con la diabetes, la obesidad, la mala alimentación y otros factores que son prevenibles y tratables, según un informe muy citado de 2017, publicado en *The Lancet*. «La moraleja es que si cuidamos la salud metabólica cuidamos la salud cognitiva», concluye Brinton. «No es posible cambiar el sexo cromosómico ni la edad ni la variante del gen. Pero sí mejorar la salud metabólica y, con ello, reducir el riesgo», añade Mosconi. Todo el mundo, en especial las mujeres en los 40 y 50 años, «debe conocer sus datos», comenta en referencia a la variante de *APOE*, el perfil metabólico y la bioquímica sanguínea, e incluso imágenes cerebrales, sobre todo a medida que vayan apareciendo nuevos biomarcadores de imagen que sean específicos de cada sexo. «Espero que las tomografías pasen a formar parte del estudio diagnóstico de todas las mujeres (y los hombres) de mediana edad por razones preventivas, de igual modo que ya contamos con las mamografías y las citologías», explica. La consigna es «prevención», palabra que antaño raramente se asociaba con el alzhéimer.

Sigue debatiéndose si la hormonoterapia debiera formar parte del protocolo. Pero la medicina de precisión, que se sirve de pruebas genéticas y del análisis de datos, está llegando a la hormonoterapia. A este respecto, Brinton afirma que pronto los médicos indicarán tratamientos de precisión según los biomarcadores de riesgo, como la variante de *APOE*, los antecedentes obstétricos o los síntomas menopáusicos, entre otros factores. Y se están gestando nuevas versiones del tratamiento hormonal. Karyn Frick, neurocientífica en la Universidad de Wisconsin en Milwaukee, y sus colaboradores han desarrollado una versión «denudada» del 17β-estradiol que se cree que mitiga el riesgo de cáncer de mama asociado con la hormonoterapia clásica. El fármaco, que todavía debe ser sometido a ensayos clínicos, ha mostrado resultados alentadores en los estudios preliminares con ratones. «Actuó como un reforzador de la memoria», según Frick.

Para los casos que no pueden prevenirse, el laboratorio de Brinton está desarrollando un tratamiento llamado Allo basado en la alopregnanolona, un esteroide natural que estimula la producción de nuevas neuronas. En un modelo murino del alzhéimer, este compuesto revertió los déficits cognitivos y restituyó el aprendizaje y la memoria. En un prometedor estudio clínico de fase 1 con pacientes aquejados por demencia leve, el volumen de sustancia gris del hipocampo se regeneró y la inflamación cerebral se redujo. Brinton afirma que a lo largo de este año está previsto iniciar un ensayo clínico de fase 2 con portadores del *APOE4*, financiado por el Instituto Nacional del Envejecimiento de EE.UU.

En 2016, los Institutos Nacionales de Salud de ese país comenzaron a exigir que las investigaciones que financian contemplaran el sexo como una variable biológica. La lenta evolución de la enfermedad significa que deberán pasar años antes de que las mujeres puedan beneficiarse de los nuevos estudios sobre la menopausia. Entre tanto, la prevención debe seguir siendo una medida esencial: los consejos incluyen una alimentación predominantemente vegetal, baja en azúcar y en ácidos grasos *trans* y saturados; actividad física; reducción del estrés, y siete horas de sueño que depuren las proteínas amiloide beta y tau, sobre todo en las féminas de mediana edad. «Las mujeres cuidamos de los demás y nos dejamos en último lugar, pero ya no podemos postergar más la salud», concluye Brinton. IyC

PARA SABER MÁS

How would we combat menopause as an Alzheimer's risk factor? Lisa Mosconi and Roberta Diaz Brinton en *Expert Review of Neurotherapeutics*, vol. 18, n.º 9, págs. 689-691, septiembre de 2018.

Understanding the impact of sex and gender in Alzheimer's disease: A call to action. Rebecca A. Nebel et al. en *Alzheimer's & Dementia: The Journal of the Alzheimer's Association*, vol. 14, n.º 9, págs. 1171-1183, septiembre de 2018.

Estrogens and memory: Basic research and clinical implications. Editado por Karyn Frick. Oxford University Press, 2020.

The XX brain: The groundbreaking science empowering women to maximize cognitive health and prevent Alzheimer's disease. Lisa Mosconi. Penguin Random House, 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Estrógenos de diseño. V. Craig Jordan en *IyC*, diciembre de 1998.

Alzhéimer: diferencias entre sexos. Rebecca A. Nebel en *IyC*, julio de 2019.

Ellen Ruppel Shell es periodista y profesora de periodismo especializada en ciencia, economía y sociedad.



EL FUTURO DE LA MEDICINA
UNA NUEVA ERA PARA EL ALZHÉIMER

LA INFLUENCIA DE LA POLUCIÓN EN LA DEMENCIA

Las partículas que expulsan al aire los tubos de escape y otras fuentes contaminantes se vinculan ahora con el alzhéimer. Estudios recientes demuestran que pueden llegar hasta el cerebro desde la nariz y los pulmones

Ellen Ruppel Shell

Mi primer día en Ciudad de México no fue fácil. La nube de contaminación era tan densa que subí jadeando las escaleras hasta la habitación del hotel. Me había preparado para la jaqueca provocada por la altitud y la baja densidad del aire, pero no para el escozor en los ojos y el ardor en el pecho por la contaminación atmosférica.

Declarada por la ONU como la metrópolis más contaminada del mundo en 1992, las autoridades de la capital mexicana han trabajado con ahínco para no lucir ese dudoso título. Lo han logrado en parte: la ciudad se enorgullece con razón de sus kilómetros de carriles para bicicletas y sus parques frondosos. Pero basta con alzar la vista hacia el horizonte enturbiado para comprobar que el esfuerzo no ha bastado. La mayoría de los días, la conurbación presenta niveles de partículas de hollín en suspensión que rebasan ampliamente las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud, además de niveles elevados de otros contaminantes. Congestionada por más de 9,6 millones de vehículos y unas 50.000 chimeneas, Ciudad de México bulle inmersa en un caldo tóxico que corroe el corazón y los pulmones. Muchos científicos coinciden ahora en que esa contaminación daña también el cerebro.

En un estudio llevado a cabo en 2018 se descubrieron las lesiones distintivas de la enfermedad de Alzheimer en el cerebro de habitantes de Ciudad de México en su tercer y cuarto decenio de vida —décadas antes de lo que suelen detectarse los signos de este mal—, que se atribuyeron al aire contaminado. Los autores del estudio, investigadores adscritos a instituciones de México y EE.UU., también han observado esa precoz aparición de daños en lactantes y niños pequeños. Y la capital mexicana no es la única urbe donde el aire malsano ha sido vinculado con el alzhéimer. Hace pocos años, un equipo de Harvard difundió los datos de un gran estudio con 10 millones de beneficiarios de Medicare mayores de 65 años y naturales de 50 ciudades del nordeste de EE.UU. Los investigadores señalaron una estrecha correlación entre la exposición a ciertos contaminantes del aire y varios trastornos neurodegenerativos, entre ellos el alzhéimer.

Otros estudios de Inglaterra, Taiwán y Suecia, además de otros países, han arro-



jado conclusiones similares. «La contaminación atmosférica se está erigiendo en uno de los campos de investigación más candentes en el alzhéimer», asegura George Perry, neurobiólogo en la Universidad de Texas en San Antonio y director del *Journal of Alzheimer's Disease*. En un campo que desde hace décadas se ha centrado en la herencia y la acumulación de la proteína amiloide beta como causas de la enfermedad, afirma Perry, numerosos expertos coinciden ahora en que la contaminación atmosférica desempeña un papel importante. Esta aseveración es secundada por Masashi Kitazawa, toxicólogo en la Universidad de California en Irvine, experto en toxinas ambientales. «La genética tiene un peso enorme en la investigación de la enfermedad, por lo que durante años casi nadie se ha dignado a mirar más allá de los genes. Pero en los últimos tres o cuatro años, el número de artículos que vinculan la contaminación y el deterioro cognitivo se ha disparado.» En la forma más habitual del alzhéimer, la de aparición tardía, se calcula ahora que entre el 40 y el 65 por ciento del riesgo radica en factores ambientales, como los hábitos personales y la exposición a un ambiente nocivo. El aire contaminado es uno de los factores principales.

Los contaminantes más preocupantes son las gotículas llenas de toxinas o las partículas sólidas suspendidas en el aire con un diámetro de una trigésima parte del de un cabello humano. Denominadas materia particulada fina (abreviada como $PM_{2,5}$, porque el diámetro de las partículas es inferior a 2,5 micrómetros), se generan por la combustión del petróleo y del gas en coches, camiones y centrales eléctricas, así como por la quema de carbón o madera. Al ser inhaladas, penetran profundamente en los pulmones y se abren paso hasta el torrente sanguíneo. Se ha demostrado que, cuando las $PM_{2,5}$ penetran en el cuerpo de esa forma, causan estragos en el aparato respiratorio y circulatorio que al final provocan cáncer, ataques cardíacos, ictus y muertes prematuras.

Antes se creía que el cerebro quedaba a salvo de esos efectos nefastos gracias a la barrera hematoencefálica, una red de células que tapizan los vasos sanguíneos del encéfalo y que están tan estrechamente cohesionadas entre sí que impiden la entrada de sustancias tóxicas en los tejidos cerebrales. Por desgracia, ahora hay pruebas convincentes de que las $PM_{2,5}$ penetran en él a través de dos vías. La primera es la alteración que ellas mismas ocasionan en la barrera, a la que debilitan y hacen más porosa a los contaminantes. La segunda es la entrada furtiva a través de la nariz y de los nervios olfativos, por los que viajan hasta el bulbo olfativo del cerebro burlando la barrera. Así pues, este órgano no está más protegido que los demás del acoso incesante de la contaminación.

EXPOSICIÓN ELEVADA

Gran parte del trabajo reciente que vincula la mala calidad del aire con las enfermedades cerebrales arranca de las investigaciones pioneras de Lilian Calderón-Garcidueñas, médica y neuropatóloga de la Universidad de Montana. Nacida y criada en una localidad cercana a Ciudad de México, estudia desde hace décadas el impacto del aire nocivo de la región sobre la salud. A inicios de la década de 2000 examinó a 40 perros que vagaban por las zonas más contaminadas de la capital y halló en su cerebro alteraciones histopatológicas similares a las del alzhéimer. Este descubrimiento la incitó a explorar el mismo órgano en personas que habían vivido en las mismas barriadas. Lo que vio la alarmó: niños y de bebés de apenas 11 meses presentaban en el cerebro proteínas asociadas al alzhéimer. «La exposición a la contaminación atmosférica debe considerarse un factor de riesgo del alzhéimer», escribió en 2008, sobre todo para aquellos que están predispuestos genéticamente a sufrir la enfermedad.

Las conclusiones de Calderón-Garcidueñas han sido corroboradas por otros investigadores. Jennifer Weuve, profesora asociada de la Facultad de Salud Pública de la Universidad de Boston, dirigió uno de los primeros estudios de alcance nacional en EE.UU. sobre el vínculo entre la contaminación atmosférica y las enfermedades cerebrales, cuyos resultados se publicaron en 2012. «Tenemos dos pistas sobre la relación entre el envejecimiento del cerebro y la contaminación atmosférica. La primera es el impacto sobre el aparato circulatorio: los infartos cardíacos y los ictus. El cerebro depende de la circulación sanguínea, por lo que lógicamente esto suscitó la preocupación de que también resultara afectado. El segundo indicio es más sutil. Los toxicólogos emprendieron estudios rigurosos con animales que respiraban aire con grandes concentraciones de partículas en suspensión y descubrieron que esas partículas penetraban en su cerebro. Algunas contenían neurotoxinas conocidas, como el manganeso. Y sabíamos que no podrían traer nada bueno.»

Desde entonces se han acumulado más pruebas epidemiológicas del problema que suponen las partículas en suspensión. En 2018, el *BMJ* publicó un estudio de cerca de 131.000 londinenses de 50 a 79 años donde se concluía que los más expuestos a la contaminación atmosférica tenían más posibilidades de que se les diagnosticase una demencia en los ocho años siguientes a la observación. El vínculo era particularmente patente entre el alzhéimer y las $PM_{2,5}$. En otro estudio con 100.000 ciudadanos de Taiwán se llegó a conclusiones similares. Investigadores suecos concluyeron que la contaminación del aire aumentaba la incidencia de la demencia entre personas sin marcadores genéticos de la enfermedad.

Un estudio del año pasado halló vínculos entre la contaminación por partículas finas, los cambios estructurales en el cerebro y la pérdida de memoria en mujeres de edad avanzada

Y científicos de la Universidad de Toronto estudiaron a 6,6 millones de habitantes de la provincia de Ontario y descubrieron que aquellos que vivían en un radio de 50 metros de una carretera importante, donde los niveles de contaminantes finos son muy elevados, tenían una probabilidad un 12 por ciento mayor de sufrir demencia que los residentes a más de 200 metros de distancia de esas mismas vías.

DEL AIRE AL CEREBRO

Por supuesto, los estudios epidemiológicos tienen sus limitaciones. No es ético pedir a nadie que respire a sabiendas aire contaminado durante meses o años. Esto dificulta la ejecución de estudios comparativos que eliminarían numerosos factores ajenos a la contaminación y que

podrían predisponer a los habitantes de ciertas regiones a padecer el alzhéimer y otras formas de demencia.

«Lo ideal sería que todo el mundo llevase un medidor de la contaminación que obtuviese datos sobre la exposición en todo momento, pero esto es una ilusión», lamenta Weuve. «Así que nos vemos obligados a elaborar modelos basados en estimaciones, lo cual resulta insuficiente. En lo que concierne al alzhéimer, lo que importa es la exposición prolongada, crónica, y ni siquiera disponemos de un registro mundial de enfermos, menos aún de los recursos para mantener un seguimiento durante años hasta que los estudiados contraigan la enfermedad. Por eso es tan difícil concretar las causas.» Es más, en algunas regiones del mundo la contaminación atmosférica es tan nociva que la gente muere por una cardiopatía mucho antes de que comience a mostrar los síntomas del alzhéimer avanzado.

Para controlar mejor la causalidad, los expertos han optado por los modelos animales en busca de los mecanismos biológicos que puedan vincular el deterioro cognitivo con diversos tipos y concentraciones de contaminantes atmosféricos. En 2015, el neurobiólogo Colin Combs, jefe del departamento de ciencias biomédicas en la Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud de la Universidad de Dakota del Norte y experto en trastornos neurodegenerativos, bombeó aire con diversas concentraciones de partículas contaminantes en jaulas que albergaban ratones genéticamente idénticos durante distintos intervalos de tiempo. Constató así que a mayor exposición, mayor era el daño. «Nuestros hallazgos avalan la teoría de que la exposición prolongada a las partículas aéreas altera el cerebro y promueve la aparición de las alteraciones histopatológicas iniciales del alzhéimer», asegura. Tres años más tarde, científicos del Centro Médico Cedars-Sinaí de Los Ángeles y sus colaboradores describieron que los metales pesados del aire contaminado no solo llegaban hasta el cerebro de las ratas al cabo de pocos meses, sino que, aparentemente, también activaban genes que desencadenan trastornos neurodegenerativos y cáncer.

La contaminación atmosférica también interacciona directamente con las variantes de ciertos genes asociadas con el alzhéimer, de modo que fomenta el envejecimiento cerebral y la neurodegeneración en personas que ya tienen predisposición genética. No todos los enfermos con alzhéimer tardío presentan esos marcadores genéticos, pero muchos sí, y en ellos esa lluvia sobre mojado que supone la interacción entre los genes y el ambiente parece ser especialmente potente. La psicóloga clínica Margaret Gatz, de la Universidad de California del Sur, explica que los daños provocados en el sistema vascular por la contaminación y otros factores se asocian a un mayor riesgo de alzhéimer y otras demencias, sobre todo en las personas que tienen una predisposición genética a sufrir la enfermedad. «Existen notables indicios de que los factores de riesgo vasculares resultan más peligrosos para los portadores de la variante (o alelo) *APOE4* del gen *APOE*», afirma. «Y por esas y otras razones, numerosos estudios se han centrado en el riesgo genético de la enfermedad y han dejado de lado los hábitos personales y los factores ambientales.»

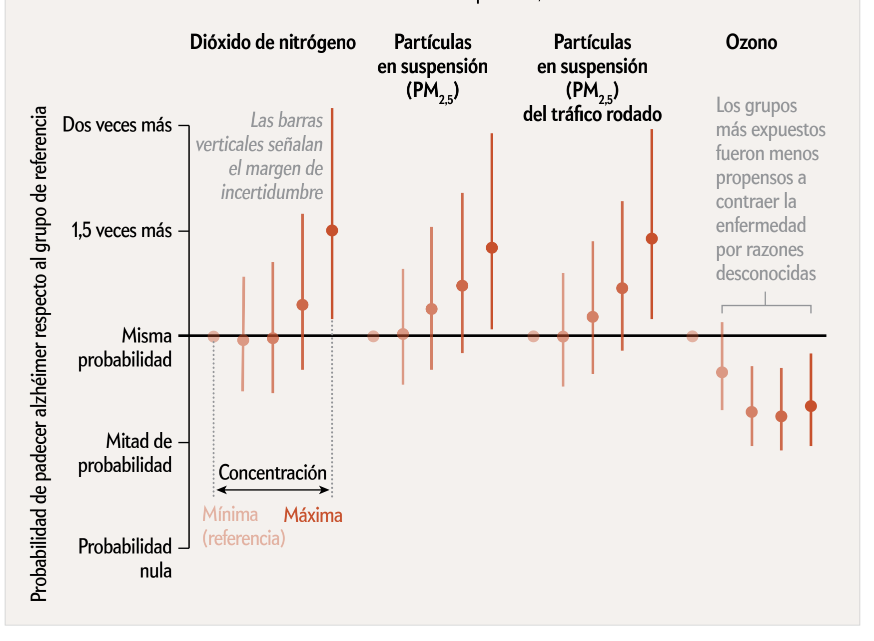
Los efectos de las sustancias tóxicas presentes en la contaminación atmosférica cuando llegan al cerebro concuerdan con varias ideas sobre el modo en que se desarrolla el daño del alzhéimer. La neurotoxicóloga Deborah Cory-Slechta, del Centro Médico de la Universidad de Rochester, afirma que tanto en animales como en humanos, esos contaminantes provocan la liberación de citocinas por las células de la microglía, las centinelas inmunitarias que residen en el cerebro. Las citocinas son moléculas mensajeras que intervienen en el control de la inmunidad y de la inflamación. En circunstancias normales, esa respuesta ayuda a proteger el cerebro contra los intrusos. Pero la exposición crónica al aire contaminado provoca la producción desmesurada de citocinas proinflamatorias que degenera en una inflamación crónica y desemboca en la muerte de las neuronas. «Las partículas ultrafinas parecen ser el factor más importante de este proceso», explica Cory-Slechta.

Esta también destaca que es difícil concentrarse en componentes concretos de esas partículas. «Por un lado, disponemos de muy pocos datos históricos referentes a ellas, por lo que es difícil juzgar sus niveles relativos en el ambiente. Y por el otro,

DATOS REVELADORES

Aire nocivo, cerebros dañados

Entre 2005 y 2013, un equipo de investigadores estudió a 131.000 personas de 50 a 79 años que habitaban en el área metropolitana de Londres. A ninguna se le había diagnosticado alzhéimer. Cartografiaron las concentraciones de ciertos contaminantes atmosféricos en su lugar de residencia y dividieron a los participantes en cinco grupos según el grado de exposición a ellos. En comparación con la exposición más baja, tomada como grupo de referencia, la probabilidad de padecer alzhéimer aumentó en los dos grupos más expuestos a contaminantes como el dióxido de nitrógeno y en los tres primeros más expuestos a las partículas tóxicas emitidas por los tubos de escape, las $PM_{2,5}$. Ese alto riesgo persistió incluso después de restar el efecto de factores tales como el tabaquismo, la edad o el sexo.



FUENTE: «ARE NOISE AND AIR POLLUTION RELATED TO THE INCIDENCE OF DEMENTIA?: A COHORT STUDY IN LONDON, ENGLAND», IAIN M. CAREY ET AL., EN *BMJ OPEN*, 11 DE SEPTIEMBRE DE 2018; AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*)

contienen multitud de sustancias que solemos agrupar juntas», lo que dificulta saber cuál es la causante del efecto nocivo.

Las partículas contaminantes derivadas de la quema de los combustibles fósiles y de otras fuentes contienen cientos de sustancias, desde gases nocivos como el dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno hasta el polvo generado por los frenos, los neumáticos y el embrague de los automóviles y los camiones. Cory-Slechta afirma que esos contaminantes tienden a acumularse en el cerebro con el paso de los años, lo que ayudaría a explicar por qué el alzhéimer es un trastorno propio de la vejez. Pero matiza que aún persisten numerosas incógnitas sobre las sustancias concretas que penetran en el cerebro a través del aire —no está claro que todas accedan a los tejidos cerebrales— y cuáles de ellas causan problemas. «Sabemos que el cerebro necesita hierro, zinc, cobre y otros metales, pero en ciertas cantidades. ¿Qué sucede cuando estas se sobrepasan?», se pregunta. «Sabemos que un exceso de hierro provoca estrés oxidativo y neurodegeneración. También que otros contaminantes, como el aluminio, no cumplen ninguna función esencial en el cerebro pero son proclives a acumularse y a provocar una respuesta inflamatoria. Con franqueza, deberíamos prestar más atención a este aspecto. Y no solo se trata de los metales. Los contaminantes orgánicos también podrían estar implicados en los trastornos neurodegenerativos.»

Un tipo de contaminantes orgánicos son los lipopolisacáridos, moléculas grandes que desprenden las bacterias diseminadas desde las plantas de tratamiento de residuos, entre otras fuentes. Se ha descubierto que tales moléculas se adhieren a las partículas y, al ser inhaladas, desatan una respuesta inflamatoria en los pulmones. En los estudios con animales, los lipopolisacáridos y otras sustancias orgánicas provocan inflamación y degeneración cognitiva.

PARTÍCULAS Y PÉRDIDA DE MEMORIA

Jiu-Chiuan Chen, médico epidemiólogo en la Universidad de California del Sur y especialista en el efecto de los contaminantes atmosféricos sobre el cerebro, afirma que aunque el impacto de cada sustancia sigue siendo objeto de debate, no hay duda de que el efecto de la mezcla conjunta es nocivo y provoca problemas cognitivos. Chen es uno de los autores de un estudio publicado el pasado año en la revista *Brain* que señaló vínculos claros entre las partículas finas contaminantes, los cambios en la estructura del cerebro y la pérdida de memoria en mujeres de edad avanzada. Él y sus colaboradores cuantificaron las alteraciones cerebrales y la memoria mediante pruebas cognitivas y neuroimágenes, amén de un modelo matemático que incorporaba dos fuentes de datos sobre la calidad del aire.

«Vimos que las mujeres más expuestas a la contaminación sufrían un deterioro precoz de la memoria episódica», explica. Este tipo de memoria a largo plazo rememora una experiencia previa junto con el momento y el lugar del acontecimiento y las emociones asociadas. El declive que Chen descubrió en esas mujeres precedió a cualquier síntoma patente del alzhéimer y resultó independiente de la salud cardiovascular. La investigación de este trastorno ha establecido que las personas con un declive de la memoria episódica presentan un riesgo muy acusado de sufrir en décadas posteriores la enfermedad con toda su crudeza.

«Más de una decena de estudios vinculan la exposición a la contaminación atmosférica con la demencia en la vejez», afirma Chen. «Los datos son bastante convincentes. No sabemos si la exposición durante los primeros años de vida puede ser otro determinante. Pero en los estudios toxicológicos con animales, se los expone a los contaminantes desde el inicio de la vida, y los cambios histopatológicos observados denotan problemas. Al parecer, las partículas pequeñas aceleran la acumulación de las placas de amiloide, aunque no estamos seguros de que suceda lo mismo en la especie humana. Además, podría intervenir un componente genético, por lo que ciertas personas serían más proclives al efecto de la contaminación que otras. Existiría un colectivo especialmente sensible que correría un riesgo más acusado. Los estudios carecen todavía de la potencia necesaria para abordar esta pregunta, pero creo que acabarán contando con ella.»

REDUCCIÓN DEL RIESGO

Mientras esta dolorosa enfermedad sigue afectando a millones de personas en todo el mundo, las noticias referentes a los descubrimientos sobre la contaminación atmosférica traen consigo un mensaje de aliento, opinan varios científicos. Y es que está en nuestras manos hacer algo para paliar el riesgo. De momento, la mayoría de los medicamentos no han servido de mucho a los enfermos, afirma Melinda Power, epidemióloga de la Universidad George Washington que intenta identificar los factores de riesgo de deterioro cognitivo y demencia que se puedan modificar. «En la actualidad, nuestra mejor baza parece radicar en la prevención a través de la reducción de los factores ambientales y la adquisición de hábitos saludables. Y en este ámbito, la exposición a la contaminación atmosférica está adquiriendo una gran preponderancia.»

Los datos referentes a los daños cerebrales constituyen un argumento de peso para endurecer los controles de la calidad del aire, afirma la epidemióloga de la Universidad de Michigan Kelly Bakulski. «Es un campo con mucho recorrido por delante. A diferencia de los genes, sí podemos controlar los factores ambientales: eliminar esos contaminantes de nuestro entorno no tendrá nada de negativo y sí mucho de positivo.»

A este respecto, Gatz opina que unos cambios sencillos en los hábitos personales serían de ayuda. «Se ha visto que la actividad física reduce el riesgo», pues aumenta tanto el riego sanguíneo en el cerebro como los niveles del factor neurotrófico cerebral, una proteína que fomenta el crecimiento y la mantenimiento de las neuronas.

Sabedores de los estragos que inflige la enfermedad, ha llegado la hora de tomarse en serio esos cambios. «Contamos con los medios para ello, y dado el riesgo que entraña no hacerlo, hemos de pasar a la acción», concluye Bakulski. IyC

PARA SABER MÁS

Alzheimer's disease and alpha-synuclein pathology in the olfactory bulbs of infants, children, teens and adults ≤ 40 years in metropolitan Mexico City: *APOE4* carriers at higher risk of suicide accelerate their olfactory bulb pathology. L. Calderón-Garcidueñas et al. en *Environmental Research*, vol. 166, págs. 348-362, octubre de 2018.

Particulate matter air pollution, physical activity and systemic inflammation in Taiwanese adults. Z. Zhang et al. en *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 221, n.º 1, págs. 41-47, enero de 2018.

Particulate matter and episodic memory decline mediated by early neuroanatomic biomarkers of Alzheimer's disease. D. Younan et al. en *Brain*, vol. 143, n.º 1, págs. 289-302, enero de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Minúsculas y penetrantes. Anna Von Mikecz en *MyC*, n.º 53, 2012.

Contaminación atmosférica y salud pública. Mark J. Nieuwenhuijsen en *IyC*, agosto de 2019.

por Jennifer A. Leonard

Micromamíferos de las montañas tropicales de Borneo

Los gradientes altitudinales favorecen la aparición de hábitats muy diferentes con una gran diversidad de micromamíferos, la cual es todavía muy poco conocida

Al pensar en los bosques tropicales, a muchos de nosotros nos vienen a la mente las pluvisilvas de tierras bajas, que representan la mayoría de esos bosques. Sin embargo, en las zonas tropicales de todo el mundo se elevan algunas montañas de gran altitud. Debido a los cambios ambientales rápidos asociados al fuerte gradiente altitudinal, estas montañas albergan una sucesión de hábitats muy diversos, cada uno ocupado por especies diferentes, a menudo endémicas y muy divergentes de otras que son morfológicamente similares.

Una de estas montañas tropicales es el monte Mulu, de 2376 metros de altitud, en el estado malasio de Sarawak, en Borneo. La pendiente pronunciada de sus laderas ha dificultado enormemente el acceso a la cumbre hasta hace unas pocas décadas. Nuestro grupo de investigación las ha estado explorando para documentar la fauna de pequeños mamíferos que alberga. Con la ayuda de trampas, obtenemos datos y muestras de los animales que capturamos. Utilizamos herramientas genéticas, análisis de isótopos estables y estudios morfológicos para aprender sobre la ecología, la historia evolutiva de estas especies y sus comunidades.

Los muestreos nos han permitido encontrar algunas de las mismas especies que hemos hallado en otras montañas altas de Borneo, según describimos en *PeerJ* en octubre de 2019. Destacan varias especies endémicas: la ardilla de montaña *Sundasciurus everetti* y la musaraña arborícola *Tupaia montana*, de morfologías muy parecidas pero pertenecientes a linajes separados hace más de 70 millones de años. También hemos observado la rata gigante de montaña *Sundamys infraluteus*, endémica de los bosques de altura de Borneo. Sin embargo, no hemos localizado el gimnuro de cola corta (*Hylomys suillus*), una especie de erizo que había sido detectada en las primeras expediciones realizadas en zonas altas de la región a finales de los 70, lo que hace pensar que podría haberse extinguido.

Nuestros resultados indican que las comunidades de micromamíferos tropicales están estrechamente ligadas a su hábitat: sus poblaciones se han expandido o contraído en el pasado de forma paralela a como lo ha hecho la distribución de los diferentes tipos de bosques. Con el calentamiento global actual, los bosques de montaña se están reduciendo, y muchas de las especies que hemos encontrado probablemente se extinguirán durante este siglo si no hacemos nada para evitarlo, como le puede haber sucedido a *Hylomys suillus* en Mulu.

Jennifer A. Leonard
Estación Biológica de Doñana, del CSIC



EL ARDILLO PIGMEO (*Exilisciurus exilis*) habita predominantemente en el bosque de tierras bajas de Borneo, donde suele alimentarse de insectos y de la corteza de los árboles.



Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

LA MUSARAÑA ARBORÍCOLA (*Tupaia montana*) es aparentemente muy similar a la ardilla de montaña *Sundasciurus everetti*, pero representa a un linaje evolutivo muy distinto. Ambas prefieren los bosques montanos.

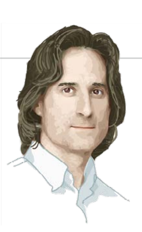
LA RATA GIGANTE DE MONTAÑA (*Sundamys infraluteus*), capturada aquí para la toma de muestras biológicas, es endémica de los bosques de altura de Borneo.

CARLES VILÀ (*E. exilis*); JENNIFER A. LEONARD (*resto de ilustraciones*)

EL BOSQUE TROPICAL DE TIERRAS BAJAS que se recorre al acceder al monte Mulu presenta árboles muy altos, con lianas que los conectan, y un sotobosque poco denso (*izquierda*). Allí las ardillas endémicas comparten con los primates los recursos de los árboles. Al acercarnos a la cumbre, a partir de los 2000 metros, el bosque tropical se empobrece en árboles y ganan terreno las zonas con arbustos o desprovistas de vegetación (*derecha*).

por Jon Umerez

Jon Umerez es investigador titular en el Departamento de Lógica y Filosofía de la Ciencia de la Universidad del País Vasco.



Cómo trascender la vida natural

Orígenes, evolución y retos de la vida artificial y la biología sintética

Además de otras muchas incertidumbres y complejidades conceptuales, al reflexionar sobre el fenómeno de la vida se da una paradójica circunstancia. Por un lado, no hay nada que nos parezca más natural. Pero, por otro, la humanidad siempre ha ambicionado reproducir la vida de forma artificial. Ahí está, para atestiguarlo, la larga lista de autómatas, o la aún más larga historia de mitos (Golem, Prometeo...) y creaciones literarias (Frankenstein, el Dr. Moreau...).

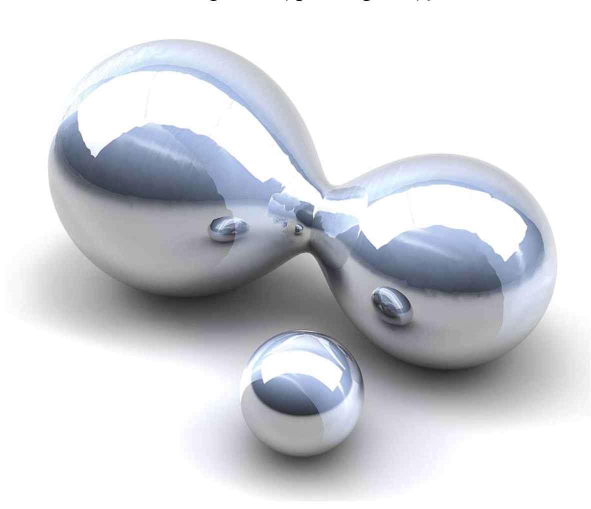
Asimismo, no hay nada más sencillo que crear vida de modo natural. Lo hacen constantemente, de forma espontánea, organismos de cualquier nivel de complejidad. Sin embargo, resulta increíblemente difícil, por no decir imposible hasta el momento, replicar la vida de manera artificial, es decir, producir seres vivos por medios y vías diferentes a las de la reproducción biológica, sea en el laboratorio, el taller o el ordenador.

Esta paradoja alimenta gran parte de las motivaciones de lo que podemos denominar ampliación de la biología, y que se está produciendo en tres direcciones: desde dentro de la propia biología, desde la exobiología y desde la vida artificial.

Desde la biología se intenta originar vida mediante diversas técnicas de síntesis bioquímica (in vitro). Esta expansión, que tiene ya una tradición de décadas, abarca tanto los estudios sobre el origen de la vida como los avances de la biotecnología. La biología sintética, que ha recibido un fuerte impulso en los últimos años, se inserta aquí. La exobiología, por su parte, ofrece un encuadre disciplinar contemporáneo a la tradicional búsqueda de vida extraterrestre. La vida artificial, por último, explora la posibilidad de generar vida sobre nuevos materiales, y se caracteriza por desarrollar simulaciones computacionales y nuevas formas de robótica.

Las tres expansiones comparten un núcleo común: todas ellas implican una ampliación teórica, en forma de avance conceptual, de lo que entendemos por vida. Las tres exigen que redefinamos el propio concepto, más allá de la visión tradicional.

No obstante, utilizan metodologías y enfoques radicalmente distintos. La exobiología se sirve de sondas espaciales u otros instrumentos de exploración para identificar, fuera de la Tierra, buenos candidatos a ser llamados seres vivos. La síntesis bioquímica, por su parte, y las diversas biotecnologías, junto a la biología sintética, tratan de re-crear sistemas vivos a partir de los ya existentes. Y, por último, la vida artificial, sea en sus vertientes computacional o robótica, aspira a la creación de nuevas formas de vida, o bien de nuevas entidades similares a las vivas.



GETTY IMAGES/DEVRIMB/ISTOCK

Dejaremos ahora de lado la exobiología para centrarnos en la vida artificial, con alguna breve referencia al más reciente ámbito de la biología sintética y al contraste mutuo de estas dos últimas disciplinas. En este sentido, si prestamos atención a los respectivos contextos, tanto temporales como conceptuales, del surgimiento de ambas disciplinas con sus denominaciones específicas, encontramos ya de entrada algunas diferencias notables.

La vida artificial surge en el marco de la explosión de lo que se dio en llamar las «ciencias de la complejidad». Estas toman cuerpo durante los años 80 del siglo pasado, en torno a las conferencias organizadas en el Instituto de Santa Fe, fundado en 1984 en la ciudad homónima. El primer volumen de lo que luego constituiría la serie *Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity* se dedicó a explorar las «síntesis emergentes en ciencia». Este nuevo ámbito de estudio interdisciplinar se caracteriza, brevemente, por abordar, con instrumentos computacionales (modelos y simulaciones) y un enfoque común, fenómenos muy diversos, desde los físicos hasta los sociales. Lo hace sobre la base de que distintos fenómenos comparten unos rasgos característicos muy precisos, que son los que los identifican como complejos: comportamientos globales a partir de la interacción de componentes simples, fenómenos emergentes, propiedades no-lineales, disipativas, autoorganizativas, evolutivas y adaptativas.

La vida natural sería uno de estos fenómenos complejos, pues presenta dichas características. Pero, puesto que no es el único fenómeno complejo, las características de la vida natural tal vez puedan ser producidas artificialmente en ámbitos muy distintos.

La primera conferencia sobre vida artificial («Artificial life: The proceedings of an interdisciplinary workshop on the synthesis and simulation of living systems») tuvo lugar al poco de la fundación del Instituto, en septiembre de 1987. Sin embargo, no se celebró en Santa Fe, sino, curiosamente, en el cercano Laboratorio

Nacional de Los Álamos, creado durante la Segunda Guerra Mundial para coordinar la investigación científica del proyecto Manhattan, conducente al desarrollo de las primeras bombas nucleares.

Según la definición original de Chris Langton, promotor de esa primera conferencia, la «vida artificial es el estudio de sistemas construidos por el ser humano que exhiben los comportamientos característicos de los sistemas vivos naturales. Complementa a las ciencias biológicas tradicionales, que se ocupan del análisis de los organismos vivos, intentando sintetizar comportamientos como-vivos [*life-like*] en ordenadores y otros medios artificiales». Así, se propone extender los fundamentos empíricos en los que se basa la biología, para ir más allá de la vida que ha evolucionado en la tierra, sustentada en las cadenas de carbono. Lo que da lugar a una aspiración tan ambiciosa como es la de «enmarcar la vida tal y como la conocemos en el panorama más amplio de la vida tal y como podría ser».

A partir de ese primer simposio, la comunidad de investigadores en vida artificial fue creciendo rápidamente. Sus trabajos han visto la luz, por una parte, en la continuación de esa conferencia, de la cual se han celebrado quince ediciones, hasta la de 2016. Por otra parte, en su análoga europea, la Conferencia Europea en Vida Artificial, de la cual se han celebrado, de 1991 a 2017, catorce ediciones. Ambos eventos han generado sendas series de actas, la mayoría publicadas por MIT Press. En 2018, la Sociedad Internacional de Vida Artificial acordó fusionar las dos conferencias bienales en una sola anual, empezando con la que se celebró en Tokio en julio de 2018.

Desde aquella primera formulación con tintes programáticos, la vida artificial en su conjunto adoptó una perspectiva funcionalista, deudora de la tradición de la inteligencia artificial. En este marco conceptual, lo que define a la vida es una forma de organización y no una materialidad específica o un sustrato de implementación único. Por ello, el objetivo es crear las condiciones de aparición de esa forma de organización en otro sustrato material distinto del carbono (*in silico*). Los esfuerzos se han centrado sobre todo en la búsqueda de modelos y de simulaciones computacionales, así como en realizaciones robóticas que instancien comportamientos que reconocemos como característicos de lo vivo: reproducción, adaptación, evolución, mantenimiento (metabolismo) y crecimiento. En consonancia con este enfoque, la vida artificial se propone contribuir al desarrollo de una biología teórica general, que pueda formular proposiciones universales acerca de la vida, sea donde sea que pueda encontrarse o sea cual sea el material de que pueda estar hecha, sin limitarse al caso conocido de la vida natural terrestre.

La biología sintética como tal, en cambio, surge a principios del nuevo siglo, en el marco de la finalización de los grandes proyectos de secuenciación genómica. Nace a partir de los ingentes esfuerzos dedicados a investigaciones como las del propio Proyecto Genoma Humano. Se conecta también con la ingeniería genética, que venía ya de los años 70 y exploraba las posibilidades del ADN recombinante. Y se enraíza, asimismo, en las más modernas biotecnologías de finales del siglo xx.

La primera conferencia internacional sobre biología sintética tuvo lugar en junio de 2004, en la sede del Instituto de Tecnología de Massachusetts. El objetivo del evento era reunir por primera vez a investigadores que estuvieran trabajando en el diseño y construcción de nuevas partes biológicas, dispositivos y sistemas biológicos integrados, o en el desarrollo de técnicas que posibilitasen dicho trabajo, y situar esta investigación en su contexto social actual y futuro. Con el transcurso del tiempo se ha ido ampliando el ámbito de estudio: al objetivo del diseño y construcción de nuevos componentes se ha añadido el del rediseño, para aplicaciones útiles, de sistemas biológicos naturales ya existentes.

Ambas líneas de investigación (vida artificial y biología sintética) comparten el riesgo de la hipérbole, de las promesas exageradas y de la creación de expectativas difíciles de sustentar y sustanciar. No obstante, este riesgo es tal vez más acuciante en el caso de la biología sintética, pues ya se ha autoimpuesto como reto el de atender a los graves problemas de la energía, la contaminación, la hambruna y las enfermedades más insidiosas. La vida artificial, por su parte, se enfrenta más bien a la dificultad de hacerse relevante para la biología, algo que no es fácil. De hecho, la relevancia para la biología general de los hallazgos obtenidos en vida artificial se ve limitada por el axioma de independencia de la implementación y por la dificultad que supone trasladar a lo artificial uno de los aspectos centrales de la vida, a saber, la autonomía.

Tal y como incisivamente apunta el filósofo de la Universidad del País Vasco Álvaro Moreno, podríamos concluir que, hasta el momento y tras ya varias décadas de experiencia, los resultados inequívocamente artificiales (vida artificial) tienen poco de vivo y los inequívocamente vivos (biología sintética) poco de artificial. Tal vez esto empiece a cambiar con el desarrollo de los biobots, de cuyo último avance hemos tenido noticias en fecha reciente. El pasado 13 de enero, Sam Kriegman, de la Universidad de Vermont, y sus colaboradores, publicaron en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, un prometedor artículo que presentaba un método para diseñar, desde cero, máquinas biológicas. Del mismo se hicieron eco inmediatamente los medios de comunicación. Se trata de un procedimiento para diseñar máquinas biológicas simuladas en el ordenador. En dicho método se usan algoritmos evolutivos que combinan múltiples constituyentes con el objeto de realizar una determinada función. A continuación, los mejores diseños se construyen combinando componentes celulares de diversos tejidos biológicos (en este caso, células de rana). Aquí sí parece darse una interesante y genuina combinación de diseño *in silico* (computación evolutiva y simulación) y construcción in vitro (materiales celulares biológicos). IyC

PARA SABER MÁS

Vida simulada en el ordenador. La nueva ciencia de la inteligencia artificial. Claus Emmeche. Gedisa, 1998.
A brief history of synthetic biology. D. Ewen Cameron, Caleb J. Bashor y James J. Collins en *Nature Reviews Microbiology*, vol. 12, págs. 381-390, abril de 2014.
Vida artificial. VV.AA. en *SEBBM* (Revista de la Sociedad Española de Bioquímica y Biología Molecular), n.º 181, septiembre de 2014.
Un cuarto de siglo de vida artificial: Balance y perspectivas. Álvaro Moreno en *Teorema*, vol. 34, n.º 1, págs. 75-94, enero de 2015.
Web de la Sociedad Internacional de Vida Artificial: **http://alife.org/**

EN NUESTRO ARCHIVO

De la complejidad a la perplejidad. John Horgan en *IyC*, agosto de 1995 (crónica de la actividad desarrollada en el Instituto de Santa Fe).
Biología sintética. Grupo Bio Fab (VV.AA.) en *IyC*, agosto de 2006.
Simulación de una célula viva. Markus W. Covert en *IyC*, marzo de 2014.
Crear vida de la nada. Robert L. Dorit en *IyC*, marzo de 2014.

por Michele Acuto

Michele Acuto es profesor y director del Laboratorio de Ciudades Conectadas de la Universidad de Melbourne.



Necesitamos una ciencia de la noche

Conocer las ciudades en la oscuridad contribuirá al desarrollo sostenible mundial

Mi interés por lo que ocurre en las ciudades durante la noche surgió hace dos lustros, al participar en un proyecto sobre la economía de los desechos que me llevó a montar en camiones de la basura de Londres, Singapur y Sídney entre las once y las cinco de la madrugada. Aquella experiencia me reveló todo un mundo de empleadas de la limpieza de oficinas, profesionales sanitarios, descomunales vehículos de circulación restringida, trabajadoras del sexo y personas sin hogar.

Ese mundo importa: la vida noctámbula de Nueva York representa una actividad económica anual de 29.000 millones de dólares y 250.000 empleos. Más de una quinta parte de la población activa de Tokio se desempeña en turnos de noche, al igual que un tercio de todos los trabajadores de la ciudad de Londres, mientras que, en Hong Kong, una de cada tres transacciones se cierra después de ponerse el sol. Las personas que trabajan de noche están expuestas a condiciones laborales más peligrosas y estresantes que quienes trabajan de día.

Los científicos y los políticos impulsan investigaciones y medidas de gestión para mejorar las ciudades, pero tienden a ignorar las horas de oscuridad. Un mundo más equitativo y sostenible necesita una ciencia de la noche con enfoque multidisciplinar que informe a los políticos sobre los problemas que afectan a las áreas metropolitanas en horario nocturno: desde la energía hasta el clima pasando por los residuos y las desigualdades.

Algunas ciudades ya se han despertado. En 2018, Nueva York estableció una Oficina de la Vida Nocturna; en 2012, Ámsterdam nombró a su «alcalde nocturno»; y Londres cuenta con un «zar de la noche» desde 2016. Pero se trata de iniciativas dispersas que deberían estar mejor coordinadas e interconectadas.

Pocos análisis indagan si las políticas acrecientan las desigualdades por la noche. Se presta atención a la hostelería y al ocio, sobre todo, aunque la mayoría de las personas que trabajan de noche lo hacen en los sectores de logística y sanidad. También debe tenerse en cuenta la creciente indigencia en las metrópolis del planeta, que afecta a 154 millones de personas (casi el 2 por ciento de la población mundial). Para ellas, la noche representa un peligro físico y psíquico.

La información sobre la noche es crucial para un planeta sostenible. En el Laboratorio de Ciudades Conectadas, trabajamos con la Escuela de Diseño de Melbourne y la empresa Arup para evaluar el progreso de las ciudades en cuestiones nocturnas teniendo en cuenta los objetivos de desarrollo sostenible de la ONU. No es un mero ejercicio académico. Está demostrado que las personas que trabajan de noche son más propensas a sufrir cardiopatías, trastornos mentales y cáncer, lo cual justifica la reivindicación de sueldos más altos en estos horarios. Asimismo, comprender que el consumo de energía alcanza su punto álgido en la noche exige racionalizar el alumbrado urbano. También pueden promoverse «medidas urbanísticas horarias» que protejan la fauna y la flora arraigadas en las ciudades. Nuestro objetivo es demostrar la complejidad y el valor de estos conocimientos, así como preparar a la próxima generación de gestores municipales para que aborden con mayor perspicacia los riesgos de la noche.



La ciencia de la noche deberá asentarse sobre los logros que ya han conseguido muchas ramas académicas y otros ámbitos. Los análisis de los fenómenos neurofisiológicos nocturnos están en boga, la «ciencia del sueño» goza de tremenda notoriedad en los medios de comunicación, y la etología nocturna gana terreno en el campo animal. En las humanidades, los estudios literarios y culturales de la «noctivagancia» tienen una larga tradición de narrar cómo se transforma nuestra sociedad después del anochecer. El geógrafo británico Robert Shaw reclama incluso el desarrollo de una «nictología» dentro de las ciencias sociales.

Las investigaciones nictológicas aún no conforman un corpus científico coherente, ni se habla lo bastante de la repercusión que tiene la noche sobre la sostenibilidad mundial. Debería haber un mayor trasvase entre las ciencias naturales y las sociales en este ámbito, en especial cuando las ideas más influyentes sobre esta cuestión provienen de cadenas de comida rápida, gigantes de la electricidad y otras industrias. McDonald's, que sigue una estrategia nocturna clara, probablemente conozca mejor la noche que la mayoría de los responsables políticos.

Urge educar sobre la noche a científicos y funcionarios para que tomen medidas más sensatas en la materia, desde urbanismo a salarios, transporte y entorno natural. Cuando los alcaldes promuevan acciones sobre asuntos de índole planetaria como el clima, la resiliencia o las migraciones, habrá que acometer estudios de la noche más meticulosos y que no se limiten a escrutar solo el sector del ocio. La noche es una vivencia que concierne a todos los habitantes del planeta. Si generamos conocimientos locales, podremos cosechar beneficios mundiales.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 576, pág. 339, diciembre de 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

ESPECIAL COVID-19

DENTRO DEL NUEVO CORONAVIRUS

LAS INTERIORIDADES DEL PATÓGENO QUE HA INFECTADO EL MUNDO

Editor: MARK FISCHETTI
Artista: VERONICA FALCONERI HAYS
Editora gráfica: JEN CHRISTIANSEN
Consultora: BRITT GLAUNSINGER, viróloga molecular, Universidad de California en Berkeley e Instituto Médico Howard Hughes

A PESAR DE LAS INCÓGNITAS QUE ENvuelven el nuevo coronavirus y la enfermedad que provoca, la COVID-19, se ha conseguido desentrañar una increíble cantidad de información en muy breve tiempo.

Nuestro planeta está poblado por miles de coronavirus. Cuatro son responsables de la mayoría de los resfriados comunes. Otros dos ya han provocado epidemias alarmantes: en 2002, uno ocasionó el síndrome respiratorio agudo grave (SARS, por sus siglas en inglés), que mató a más de 770 personas en todo el mundo, y en 2012 otro desencadenó el síndrome respiratorio de Oriente Medio (MERS, por sus siglas en inglés), que se cobró más de 800 vidas. El SARS desapareció en un año, pero el MERS todavía pulula entre nosotros.

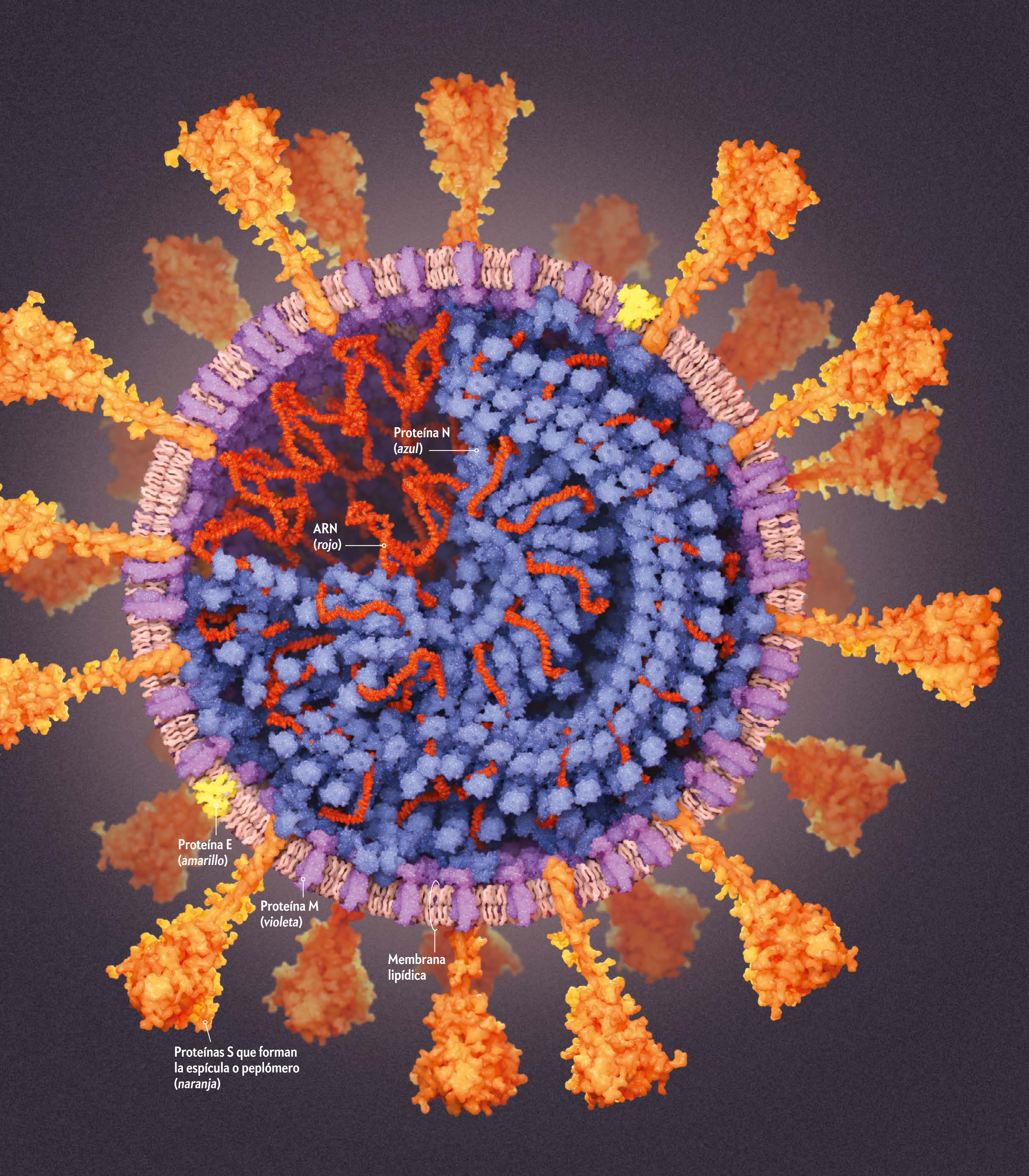
El más reciente de todos es el SARS-CoV-2, que ha desatado una pandemia mucho más mortífera, entre otros motivos porque permanece indetectable durante bastante tiempo en las personas infectadas. Quien se infectaba con el coronavirus del SARS no lo transmitía hasta pasadas de 24 a 36 horas desde la aparición de los síntomas, como fiebre y tos seca, así que era posible aislar al enfermo antes de que contagiase a otros. Pero quienes contraen la COVID-19 propagan el virus antes de presentar síntomas evidentes. Al no sentirse enfermos, trabajan, viajan, compran, comen fuera y asisten a fiestas, donde exhalan el coronavirus al aire que respiran las personas circundantes. Este permanece indetectado en el cuerpo mucho tiempo porque su genoma sintetiza proteínas que retrasan la señal de alerta para el sistema inmunitario. Mientras tanto, las células pulmonares van muriendo a medida que el infiltrado se multiplica en silencio. Cuando el sistema inmunitario detecta por fin al invasor, reacciona con todo su arsenal, con lo que, paradójicamente, daña las células que está intentando salvar.

En los gráficos que siguen, presentamos una explicación minuciosa de lo que sabíamos a mediados de mayo sobre la entrada furtiva del virus en las células humanas, la multiplicación en su interior y su liberación al medio externo, desde donde se infiltra en otras muchas células propagando la infección. Mostramos la estrategia adoptada por el sistema inmunitario para neutralizar al SARS-CoV-2 y el modo en que este consigue eludirla. Explicamos algunas habilidades sorprendentes del virus, como su capacidad para reparar las copias defectuosas conforme se fabrican y eliminar las mutaciones que podrían inutilizarlo. Finalmente, mostramos cómo los fármacos y las vacunas podrían vencer al intruso, pese a todo.

A medida que los virólogos vayan sabiendo más, iremos actualizando los esquemas en nuestra página web (https://www.investigacionyciencia.es). Cuanto más sepamos, más opciones tendremos de ganar.

Maquinaria génica

La partícula vírica del SARS-CoV-2 que llega arrastrada por el aire a la nariz o la boca de una persona tiene unos 100 nanómetros de diámetro, por lo que solo es visible con un microscopio electrónico. Se trata de una cuasiesfera de proteínas (*corte transversal*) revestida de una membrana grasa que protege una cadena retorcida de ARN, la molécula que alberga la información genética del virus. Las proteínas S forman espículas (o peplómeros) que sobresalen de la superficie y se fijan a las células humanas, cientos de veces más grandes, para que la partícula del virus, o virión, se deslice al interior. Los peplómeros recuerdan la corona solar, de ahí el nombre del virus. Las proteínas estructurales N, M y E entran en la célula, donde ayudarán a formar nuevos viriones.



FUENTE: LORENZO CASALINO, ZIED GAIEB Y ROMMIE AMARO, UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA EN SAN DIEGO (*modelo de la espícula con glucosilaciones*)

INVASIÓN DEL VIRUS Y RESPUESTA INMUNITARIA

Cuando una partícula de SARS-CoV-2 entra en la nariz o la boca, viaja por las vías respiratorias hasta que roza una célula pulmonar portadora de un receptor ACE2 en la superficie. Se fija entonces a ella, penetra en su interior y la pone a fabricar copias del virus. Luego estas escaparán abruptamente de la célula infectada, lo que provocará su muerte, y entrarán en otras células para reiniciar el proceso. Las células emiten señales de alarma para que el sistema inmunitario neutralice el patógeno, pero el virus las bloquea o intercepta, con lo que gana un tiempo precioso para la multiplicación y la propagación. Todo esto ocurre antes de que aparezcan los síntomas.

1 FIJACIÓN A UNA CÉLULA PULMONAR

En cuanto una espícula del virus se engancha a un receptor ACE2, una enzima con actividad proteasa rebana la cabeza del peplómero. Se libera así la maquinaria de fusión, que es la parte del pie que permanecía comprimida como un muelle. La ACE2 (enzima convertidora de la angiotensina 2) interviene de ordinario en el control de la tensión arterial.

2 ENTRADA FURTIVA

El virus se fusiona con la membrana de la célula pulmonar, y el ARN vírico —la molécula que contiene las instrucciones genéticas (genoma)— accede al interior celular.

La decapitación de la espícula pone en marcha la maquinaria de fusión.

La maquinaria se inserta en la membrana celular...

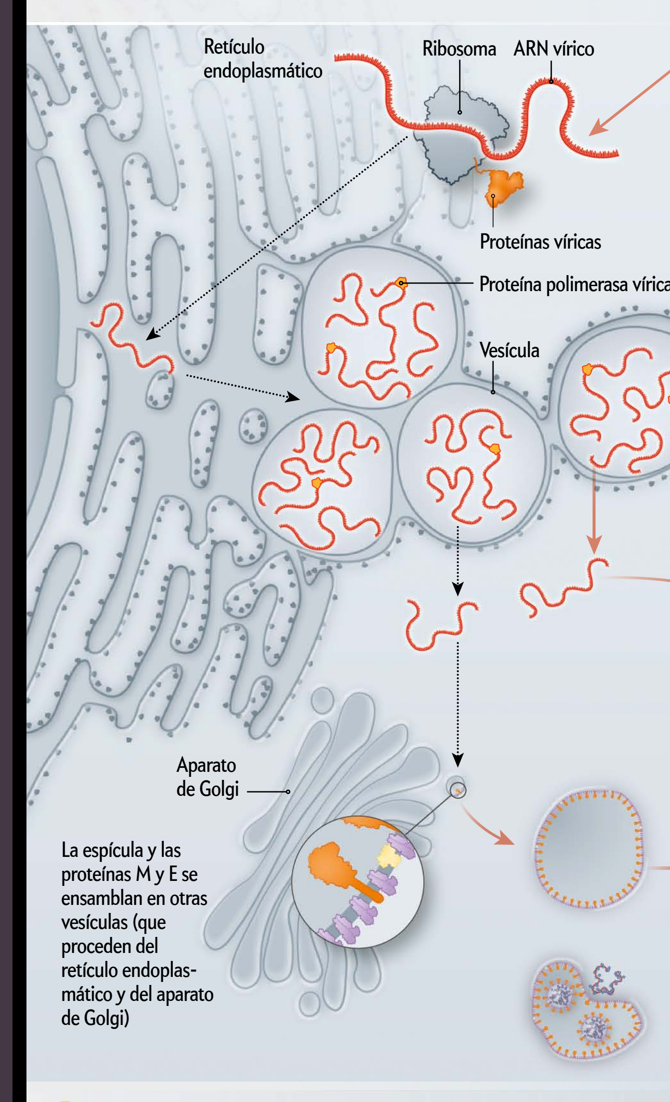
... y las pellizca para acercarlas.

Se crea un canal por el que las proteínas N y el ARN entran en la célula.

TIEMPO TRANSCURRIDO: **UNOS 10 MINUTOS**

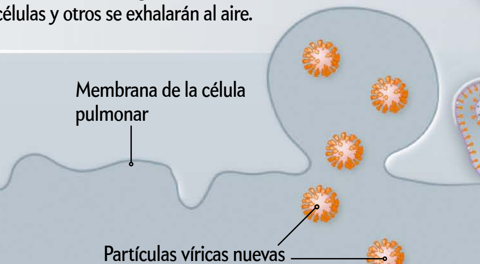
3 REPLICACIÓN

Una vez dentro, el virus presenta una docena de genes a los ribosomas celulares para que los traduzcan en proteínas. Algunas de ellas estiran el retículo endoplasmático para crear vesículas protectoras (sacos). El virus dispone de su propia copiadora de ARN, una polimerasa, que duplica su genoma dentro de las vesículas. Algunas copias se destinan a la fabricación de otras proteínas víricas, como la espícula; otras se empaquetan en nuevos viriones que acabarán por liberarse desde la célula pulmonar.



4 LIBERACIÓN

Las vesículas portadoras de los virus recién formados se fusionan con la membrana celular y abren un canal de salida para ellos. Una célula suele liberar cientos de copias y acabará muriendo bien de agotamiento, privada de recursos, bien por la acción del sistema inmunitario. Algunos virus infectarán a otras células y otros se exhalarán al aire.



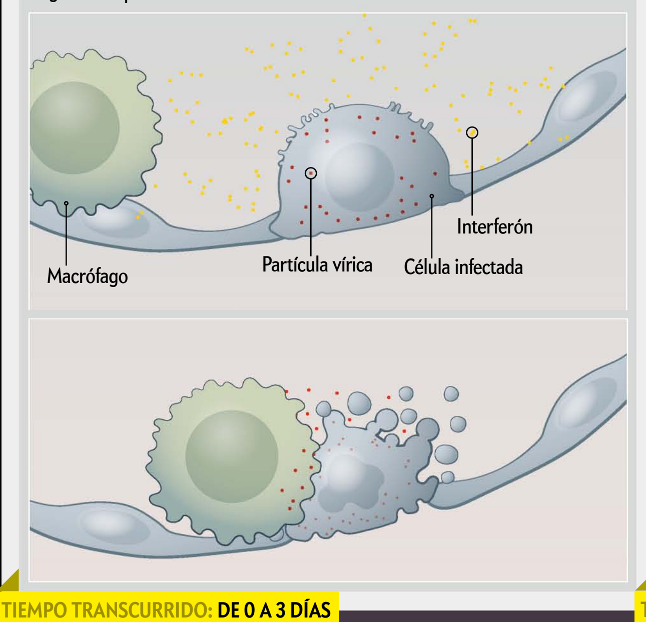
TIEMPO TRANSCURRIDO: **UNAS 10 HORAS**



5 MEDIDAS DE DEFENSA DEL SISTEMA INMUNITARIO

Cuando la infección se desata, el sistema inmunitario innato intenta proteger de inmediato a las células pulmonares, mientras el sistema adaptativo se apresta para una respuesta más contundente.

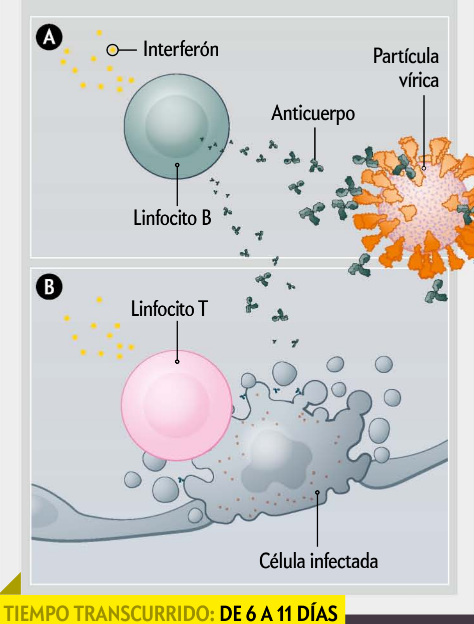
SISTEMA INMUNITARIO INNATO: La célula infectada libera interferones, unas proteínas que alertan a las células vecinas para que sinteticen moléculas que detengan al virus impidiendo la entrada de los viriones o su reproducción. El interferón también atrae células sanguíneas, como los macrófagos, para que engullan las partículas víricas.





TIEMPO TRANSCURRIDO: **DE 0 A 3 DÍAS**

SISTEMA INMUNITARIO ADAPTATIVO: El interferón alerta a los linfocitos B para que produzcan «anticuerpos neutralizantes» que reconozcan partes de la espícula y se fijen a ella **A**, con lo que impedirían su adhesión a las células pulmonares. De igual modo, atrae linfocitos T para que destruyan tanto al virus como a las células infectadas, antes de que liberen a su peligroso inquilino **B**. Algunos linfocitos B y T se convierten en linfocitos de memoria, que sabrán reconocer y combatir con rapidez futuras invasiones del patógeno.

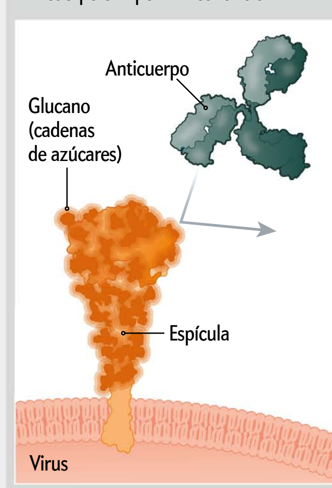


TIEMPO TRANSCURRIDO: **DE 6 A 11 DÍAS**

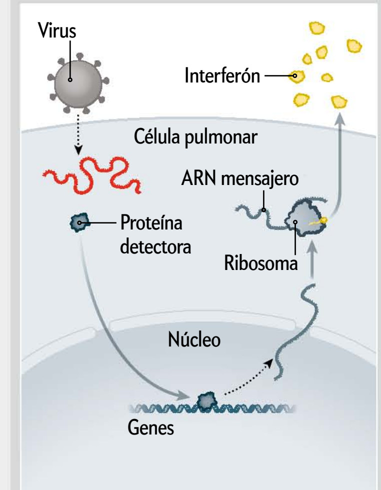
6 CONTRAMEDIDAS DEL VIRUS

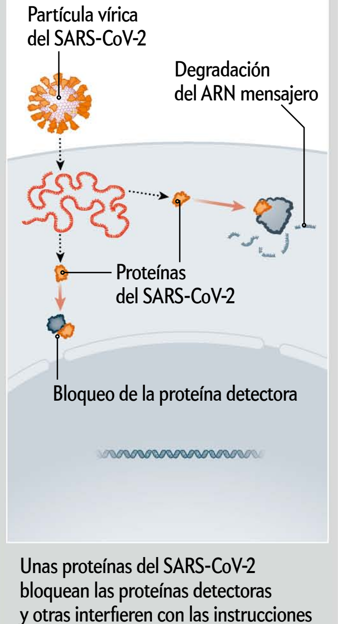
El SARS-CoV-2 despliega varias tácticas para frustrar la respuesta inmunitaria.

La espícula del virus podría camuflarse con azúcares, que con sus flexiones y oscilaciones entorpecerían la fijación del anticuerpo e impedirán su función.



Las proteínas detectoras reconocen como extraño cualquier virus que entre. Informan al núcleo celular para que active los genes que fabrican las moléculas de ARN mensajero que los ribosomas usan para sintetizar las moléculas de interferón. Y este saldrá fuera de la célula para alertar a las células inmunitarias.





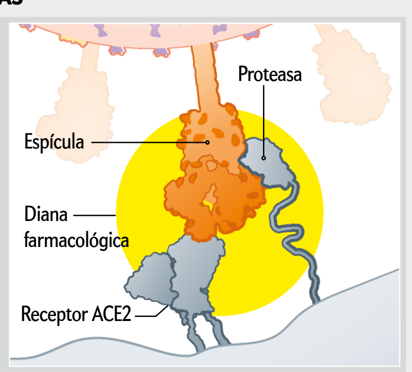
Unas proteínas del SARS-CoV-2 bloquean las proteínas detectoras y otras interfieren con las instrucciones del ribosoma.

INTERVENCIÓN CON FÁRMACOS Y VACUNAS

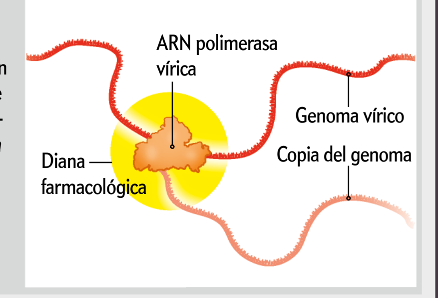
Los laboratorios de las universidades y las empresas investigan más de cien fármacos para combatir la COVID-19, la enfermedad provocada por el SARS-CoV-2. La mayoría no destruirán el virus directamente, sino que se limitarán a entorpecer su acción para que el sistema inmunitario consiga acabar con la infección. Los antivíricos suelen impedir la adhesión del virus a las células pulmonares, bloquear la reproducción cuando el virus consigue invadir la célula, o amortiguar la reacción exagerada del sistema inmunitario (responsable de los síntomas graves en los infectados). Las vacunas preparan el sistema inmunitario para que nos defienda con rapidez y eficacia contra una infección futura.

DIANAS FARMACOLÓGICAS

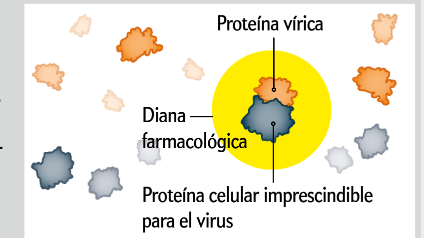
IMPEDIR LA ENTRADA DEL VIRUS EN LA CÉLULA
Un fármaco o un anticuerpo terapéutico que se acople a la espícula impediría su adhesión al receptor ACE2 de las células pulmonares. Otro fármaco podría fijarse a la proteasa para impedir el corte de la espícula, de modo que el virus no pueda fusionarse con la célula.



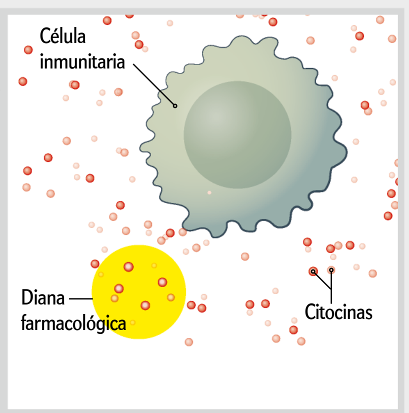
FOMENTAR LOS VIRUS DEFECTUOSOS
Un fármaco que interfiera con la ARN polimerasa vírica, que actúa junto a otra enzima denominada ExoN (*no mostrada en la figura*) para reparar los errores perjudiciales en las copias del virus, favorecería la acumulación de copias defectuosas del virus.



ENTORPECER LA MULTIPLICACIÓN
Un fármaco podría interferir con las proteínas pulmonares que el virus necesita para la síntesis de sus propias proteínas o la formación de las vesículas donde se copia su genoma.



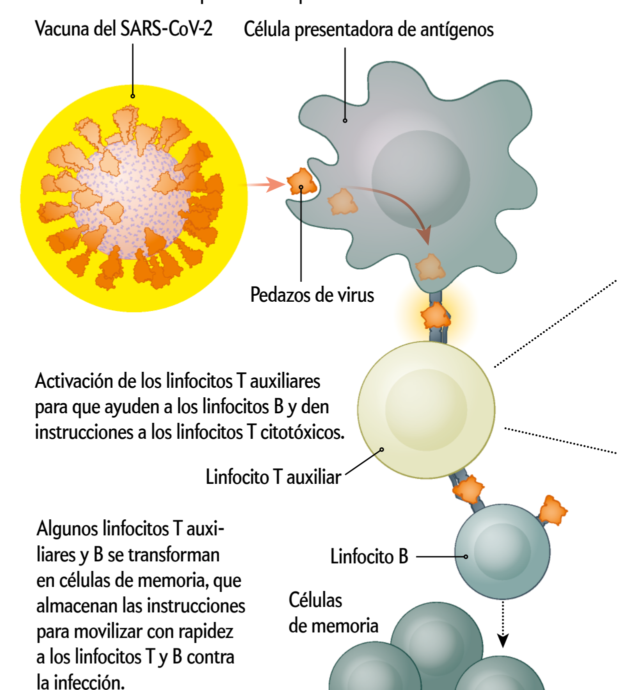
REDUCIR LA HIPERACTIVIDAD INMUNITARIA
Cuando las células inmunitarias destruyen demasiadas células pulmonares, originan tantos residuos mucosos que provocan asfixia, momento en que el enfermo tiene que ser conectado a un respirador. La producción excesiva de una citocina (proteína de alarma) como la interleucina 6 acaba hiperactivando las células inmunitarias. Los fármacos impedirían la acción de algunas citocinas.



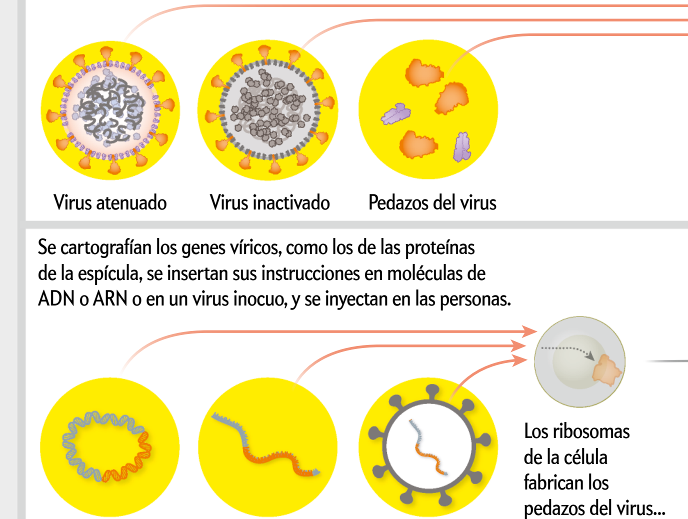
LAS VACUNAS

Una vacuna expone el sistema inmunitario a una versión inocua del virus para que estimule la síntesis de anticuerpos que detengan al patógeno y generen una memoria que nos prepare para combatir el virus real durante una infección. Los investigadores están siguiendo numerosas estrategias para formular vacunas y producirlas en masa.

PREPARACIÓN DE ANTICUERPOS
La versión vacunable del SARS-CoV-2 presenta diversas moléculas, denominadas antígenos, que pertenecen al virus real. Las células presentadoras de antígenos las atrapan y se las presentan a los linfocitos T auxiliares y a los linfocitos B. Los T ayudan a los B a sintetizar anticuerpos que se fijarán al virus real. Los linfocitos T auxiliares también advertirán a los linfocitos T citotóxicos de que deben destruir las células pulmonares que estén infectadas.



ESTRATEGIAS DE VACUNACIÓN
Se están explorando al menos seis estrategias con que fabricar vacunas a base de versiones del virus.



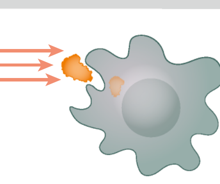
SARS-CoV-2

Anticuerpos neutralizantes

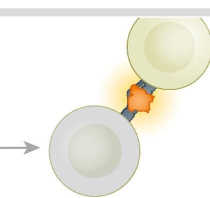
Linfocitos B

Linfocito T citotóxico

Célula pulmonar infectada



La célula presentadora de antígenos inicia la respuesta inmunitaria.



... y la célula se los presenta a los linfocitos T para desencadenar una respuesta inmunitaria.

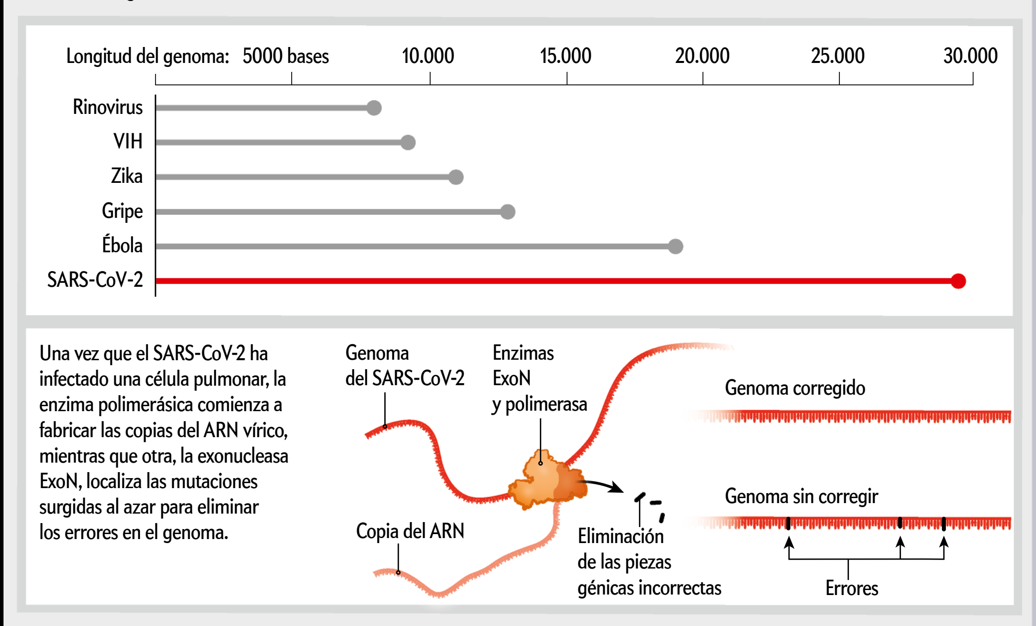
FUENTE: «THE ARCHITECTURE OF SARS-COV-2 TRANSCRIPTOME», POR DONGWAN KIM ET AL. EN *CELL*, VOL. 181, 14 DE MAYO DE 2020 (*genoma*)

EL EXTRAORDINARIO Y MISTERIOSO GENOMA DEL CORONAVIRUS

El genoma del SARS-CoV-2 es una cadena sencilla de ARN cuya longitud ronda las 29.900 bases, en el límite de los virus de ARN. El virus de la gripe tiene unas 13.500 bases, y los rinovirus del resfriado común, unas 8000 (las bases son los componentes básicos o eslabones de las cadenas de ARN y ADN). Es tan grande que durante el proceso de replicación se producirían numerosas mutaciones perjudiciales, de no ser porque es capaz de revisar y corregir las copias resultantes. Este control de calidad es propio de las células humanas y de los virus de ADN, pero es muy infrecuente en los de ARN. El larguísimo genoma también incorpora genes accesorios que no se conocen bien y que, supuestamente, ayudarían a frustrar la respuesta inmunitaria.

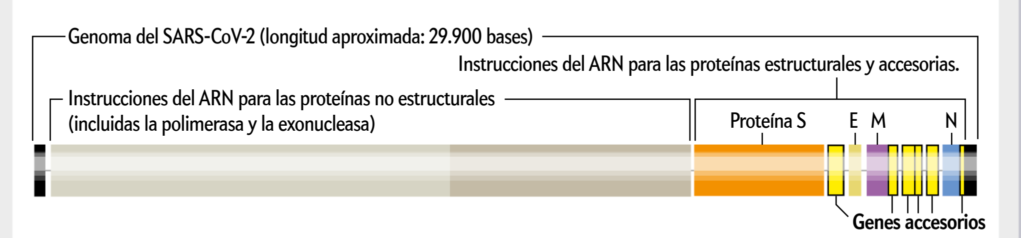
CORRECCIÓN

La gran longitud del genoma del SARS-CoV-2 le permite codificar gran cantidad de información, sintetizar más proteínas a partir de ella y quizá desplegar una estrategia de replicación más compleja que otros virus de ARN. Una de esas proteínas asistentes es ExoN, una enzima con actividad exonucleasa que ayuda a corregir y rectificar las copias a medida que se fabrican. Solo la poseen los virus con genomas de más de 20.000 bases.



GENES ACCESORIOS

Agrupados con los genes de las proteínas estructurales se encuentran ciertos fragmentos inusuales de genoma, llamados genes accesorios. Todavía no se sabe qué hacen ahí, pero se sospecha que codifican proteínas que burlan el sistema inmunitario.



PARA SABER MÁS

Coronaviruses 101: Focus on molecular virology. Videoconferencia de Britt Glaunsinger en YouTube. Publicada el 25 de marzo de 2020.

Science Forum: SARS-CoV-2 (COVID-19) by the numbers. Yinon M. Bar-On et al. en *eLife*, 31 de marzo de 2020. **https://bit.ly/2WOeN64**

EN NUESTRO ARCHIVO

Ocho estrategias para obtener una vacuna contra el nuevo coronavirus. Ewen Callaway en *IyC*, junio de 2020.

Vacunas de ADN o ARN contra el nuevo coronavirus. Charles Schmidt en *IyC*, junio de 2020.

TECNOLOGÍA

EL TRAJE NUEVO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Cada vez más decisiones de calado se están dejando en manos de supuestas máquinas inteligentes que no comprenden absolutamente nada. Por el bien de todos, urge una revisión crítica de los logros de este campo de investigación

Ramon López de Mántaras



Ramon López de Mántaras es fundador y exdirector del Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial del CSIC, en Barcelona. Ha destacado por sus trabajos en reconocimiento de patrones, razonamiento basado en casos y aprendizaje basado en la experiencia. En 2018 recibió el Premio Nacional de Investigación.



Hoy en día estamos viviendo una nueva primavera de la inteligencia artificial. Y, al igual que en primaveras anteriores, abundan las predicciones de que la llegada de máquinas dotadas de una inteligencia general igual o superior a la humana será cuestión de algunos decenios, y de que esto nos llevará a la llamada «singularidad»: el momento en que las máquinas lo harán todo mucho mejor que nosotros, incluida la propia investigación científica, lo que dará lugar a una nueva etapa evolutiva conocida como posthumanismo.

¿Es esta primavera de la IA, vestida con un traje nuevo, el indicador de que, efectivamente, estamos cerca de alcanzar el sueño de la inteligencia artificial general? ¿O quizá la inteligencia artificial está desnuda, como el emperador del cuento de Hans Christian Andersen, y el momento actual no es sino una etapa más del larguísimo camino hacia ese sueño?

En las líneas que siguen argumentaré que, en efecto, la inteligencia artificial (IA) sigue estando desnuda. Para entender por qué, es necesario analizar el origen de la fiebre que estamos viviendo, cuáles son las aplicaciones concretas que han dado lugar a todo tipo de declaraciones y titulares exagerados, y cómo funcionan realmente tales aplicaciones y de qué adolecen. Como veremos, la IA actual está muy lejos de alcanzar el objetivo de la IA general. Y ello no se debe a que aún queden por afinar unos pocos detalles o a una falta de potencia de cómputo, sino al enfoque que desde hace unos años ha adoptado esta disciplina. Lo que debería darnos miedo no es ninguna singularidad futura debido a la hipotética existencia de superinteligencias artificiales, sino un presente en el que estamos encomendando cada vez más decisiones a máquinas estúpidas.

EL NACIMIENTO DE UNA FIEBRE

El actual entusiasmo por la IA se debe a los recientes logros de la técnica conocida como aprendizaje profundo (el «traje nuevo») en el contexto del reconocimiento de imágenes, los juegos de tablero y el procesamiento del lenguaje.

Todo comenzó en 2012, cuando un equipo de la Universidad de Toronto liderado por Geoffrey Hinton consiguió que un tipo de red neuronal, llamada «convolucional», alcanzara un 85 por ciento de aciertos al clasificar, entre mil categorías posibles, 150.000 imágenes de la base ImageNet. Tales redes habían sido introducidas en 1980 a partir de los trabajos del investigador japonés Kunishiko Fukushima, quien había desarrollado el «neocognitrón», una red neuronal artificial inspirada, a su vez, en los estudios de David Hubel y Torsten Wiesel sobre el sistema visual de los animales, trabajos por los que en 1981 estos investigadores recibieron el premio Nobel [*véase* «Mecanismos cerebrales de la visión», por David H. Hubel y Torsten N. Wiesel; Investigación y Ciencia, noviembre de 1979].

Hubel y Wiesel descubrieron que nuestra corteza visual se encuentra organizada según una jerarquía de capas, de tal manera que las neuronas contenidas en cada capa detectan características de complejidad creciente en los objetos de una imagen. Por ejemplo, las neuronas de la primera capa se activan cuando detectan rasgos simples, como los bordes de los objetos. Después transmiten su nivel de activación a las neuronas de la segunda capa, donde se detectan características algo más complejas, que, en esencia, corresponden a combinaciones de los rasgos detectados en la capa anterior (por ejemplo, un conjunto de bordes que dan lugar a un polígono, un círculo, una elipse, etcétera). El proceso continúa hasta llegar a la última capa, la cual detecta objetos enteros y hace posible identificarlos. Por ejemplo, si la imagen contiene un rostro, las elipses detectadas en una de las capas intermedias corresponderían a los ojos y en la última capa se reconocería la cara entera.

Las redes convolucionales implementan computacionalmente este proceso jerárquico. Pero, si se conocen desde 1980, ¿por qué tuvieron que transcurrir más de treinta años para

EN SÍNTESIS

La inteligencia artificial (IA) vive un nuevo auge. Los éxitos de la técnica conocida como aprendizaje profundo han sido presentados por muchos científicos, compañías y medios de comunicación como una prueba de que la IA general está cerca. ¿Es cierto?

La realidad es muy otra. Un análisis pausado revela que los algoritmos actuales siguen siendo propensos a errores catastróficos, carecen de capacidad de razonamiento y contextualización, y no poseen nada remotamente parecido al sentido común humano.

Ello se explica porque, en los últimos años, la investigación en IA se ha centrado en construir máquinas eficientes para fines concretos y muy lucrativos, pero también extremadamente limitados. El coste social y científico de semejante deriva podría ser enorme.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/GREMLIN/ISTOCK

que el equipo de Toronto lograra su espectacular resultado? La razón se debe a que estas redes han de entrenarse primero con una enorme cantidad de imágenes. Y, hasta hace poco, ni había bases de imágenes lo suficientemente grandes ni existía la potencia de cómputo necesaria para poder entrenar redes multicapa en un tiempo razonable.

Dicho entrenamiento consiste en ajustar los valores numéricos correspondientes a los «pesos» de las conexiones que unen las neuronas artificiales de la red. Para ello, a la máquina se le proporciona una gran cantidad de imágenes ya etiquetadas, y un algoritmo va ajustando los valores de los pesos en función de los errores que comete la red al clasificar las imágenes de entrenamiento. Dicho algoritmo propaga el error desde la última capa hasta la anterior, de esta a la precedente, y así hasta llegar a la primera. Antes de comenzar el entrenamiento los valores asignados a las conexiones son aleatorios, y el proceso finaliza cuando los pesos alcanzan valores estables.



«ES CAPAZ DE CREAR CONOCIMIENTO POR SÍ MISMA»: Con estas palabras, reproducidas en su momento por varios medios de comunicación, describía el investigador principal del algoritmo AlphaGo los éxitos de su sucesor, AlphaGo Zero, el cual aprendió a jugar al go practicando contra sí mismo. En marzo de 2016 (*fotografía*), AlphaGo saltó a la fama al vencer a Lee Sedol, uno de los mejores jugadores de go del mundo.

Así pues, si queremos que la red aprenda a discernir entre gatos y perros, durante el entrenamiento le iremos mostrando imágenes de estos animales. La red clasificará cada una con un grado de confianza: por ejemplo, 70 por ciento «perro» y 30 por ciento «gato». Pero, si la imagen era la de un gato, la red hubiera tenido que responder en su lugar 100 por cien «gato» y 0 por ciento «perro», por lo que el algoritmo propagará hacia atrás dicho error, cambiando los pesos de las conexiones para que la próxima vez que se le muestre esa misma imagen los grados de confianza se acerquen más a los correctos. Sin embargo, es necesario mostrar un enorme número de veces cada una de las imágenes de entrenamiento para que la red neuronal converja a los valores correctos y podamos después emplearla para reconocer imágenes nuevas.

Por supuesto, todo ello requiere partir de una representación numérica de la imagen. Esto se consigue asociando un número a cada píxel, de modo que, desde el punto de vista de la máquina, una imagen no es más que una enorme matriz de números. En el caso de imágenes en color, se trata de una matriz tridimensional en la que cada dimensión corresponde a uno de los tres colores primarios (rojo, verde y azul, por ejemplo). Cada entrada puede tomar un valor entero entre 0 y 255. Así, el color negro se representa mediante (0, 0, 0), el blanco por (255, 255, 255), etcétera. Ello implica un total de 256^3 = 16.777.216 colores. La red efectúa millones de operaciones matemáticas (básicamente, sumas y multiplicaciones de matrices) que, en el caso de redes con muchas capas, pueden llegar a los miles de millones. Esta enorme cantidad de cálculos ilustra la necesidad de disponer de la enorme potencia de cómputo mencionada antes.

Una propiedad interesante de estas redes es que, por su propia estructura, son invariantes en escala y traslación. Eso significa que no importan ni el tamaño ni la posición de los objetos presentes en la imagen. Sin embargo, no son invariantes frente a rotaciones, por lo que fallan a la hora de reconocer la misma imagen boca abajo. De hecho, la búsqueda de algoritmos capaces de identificar objetos rotados constituye hoy en día un activo campo de investigación.

Poco después del éxito del grupo de Hinton, otros equipos aumentaron el porcentaje de aciertos hasta el 98 por ciento. Eso provocó que comenzaran a aparecer titulares como este:

Los ordenadores superan a los humanos en el reconocimiento y clasificación de imágenes

—*The Guardian*, 13 de mayo de 2015

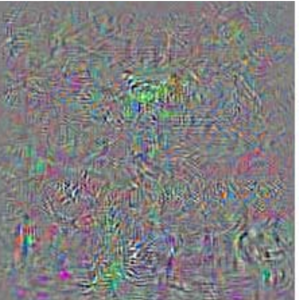
Pero vayamos por partes. ¿Seguro que las máquinas son mejores que nosotros reconociendo imágenes?

El titular citado se basaba en un estudio que afirmaba que los humanos cometen un 5 por ciento de errores al clasificar imágenes de ImageNet. Pero, si analizamos el trabajo referido, comprobaremos que a la máquina se le permitía dar una lista de cinco categorías, ordenadas de mayor a menor confianza, y se consideraba que había acertado si la categoría correcta era una de esas cinco, aunque fuera la quinta. No obstante, si solo se consideraba la primera, el error aumentaba hasta el 18 por ciento, mucho mayor que el humano. Pero, además, en el estudio había participado solo una persona, por lo que un titular más apropiado hubiera sido «Los ordenadores superan a *X* en el reconocimiento y clasificación de imágenes» donde *X* tendría que haber indicado el nombre y apellidos del individuo en cuestión. Por tanto, el titular de *The Guardian* no es cierto, aunque no se puede negar que es llamativo.

Por otro lado, a menudo se nos ha querido hacer creer que las redes neuronales artificiales aprenden por sí mismas. Sin embargo, se requiere un enorme esfuerzo por parte de los programadores para preparar una red antes de que pueda empezar a aprender. No se trata solo de etiquetar la ingente cantidad de datos necesarios para el entrenamiento, sino también de definir todo tipo de aspectos de la arquitectura de la red, lo que se conoce como «hiperparámetros». Entre estos se encuentran el número de capas intermedias, las funciones de activación de las



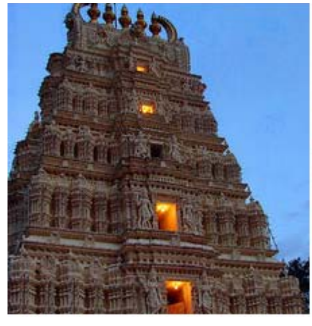
«Autobús escolar»



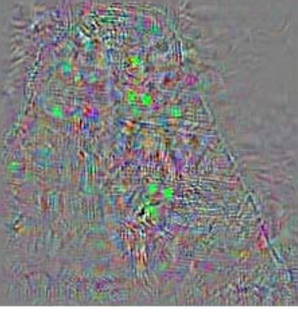
Distorsión



«Avestruz, *Struthio camelus*»



«Edificio»



Distorsión



«Avestruz, *Struthio camelus*»

CONOCIMIENTO FRÁGIL: **En 2013, un trabajo demostró lo fácil que resulta engañar a los algoritmos de reconocimiento de imágenes. La modificación de unos pocos píxeles (una distorsión imperceptible para el ojo humano, *columna central*) bastaba para que una red neuronal clasificara las imágenes de un autobús escolar o de un edificio (*izquierda*) como un avestruz (*derecha*).**

neuronas, así como diversos parámetros asociados al algoritmo de propagación del error. En redes complejas, el número de hiperparámetros que deben fijarse puede ser muy elevado y, además, deben cambiarse por completo para cada nueva tarea que queramos que la red aprenda. De hecho, es una destreza que a los programadores les cuesta mucho tiempo adquirir, ya que se trata básicamente de un proceso de ensayo y error. Algunos afirman que es casi un arte.

RECONOCIMIENTO DE IMÁGENES: APRENDIZAJE SUPERFICIAL

No cabe duda de que estamos muy lejos de poder resolver el problema del reconocimiento de imágenes. Las disparidades entre el aprendizaje humano y el artificial, incluido el aprendizaje profundo, son aún enormes.

La primera gran diferencia es que nosotros, para aprender a reconocer categorías, solo necesitamos haber visto unos cuantos ejemplos, no millones. Además, no aprendemos de forma pasiva, sino que interactuamos con nuestro entorno por medio de todos los sentidos; es decir, con nuestro cuerpo. «Ver» consiste en mucho más que reconocer cosas: implica extraer vínculos entre los objetos que vemos y entender cómo estos se relacionan con otros elementos que no están necesariamente presentes en la imagen. Si, además, vemos seres animados, como personas o animales, sabemos interpretar sus movimientos e incluso predecir de manera aproximada sus acciones inmediatas. Estas facultades resultan esenciales a la hora de tomar decisiones, como cuando vamos conduciendo y nos vemos obligados a frenar porque una persona está a punto de cruzar la calle.

La investigación actual está abordando estos problemas. Pero, como ha ocurrido siempre con la IA, lo que resulta más sencillo para los humanos acaba siendo extremadamente complejo para las máquinas. Esta aparente paradoja se explica porque, en los humanos, la capacidad de analizar una imagen no puede desligarse del resto de las facultades que conforman la inteligencia; en particular, de la capacidad de abstracción, de entender el lenguaje y de razonar con sentido común. Nada de eso puede aprenderse a partir de las imágenes de una base de datos, sino que exige interaccionar con el mundo real: una cuestión clave sobre la que volveremos más adelante.

No en vano, una gran mayoría de los investigadores en IA creemos que el aprendizaje supervisado no constituye el mejor camino para alcanzar la IA general. El motivo principal es que, incluso limitándonos a objetos físicos, no resulta nada realista pretender etiquetar absolutamente todas las cosas que podemos llegar a observar en el mundo, y sin etiquetas no puede haber aprendizaje supervisado. Otra dificultad guarda relación con el hecho de que, en prácticamente todos los dominios de la IA, antes o después aparece el llamado «problema de cola larga»: aunque existe un gran número de situaciones que suceden con una probabilidad elevada, a menudo hay una gran «cola» de situaciones (que, en conjunto, pueden llegar a sumar muchas más) que tienen una probabilidad muy pequeña de ocurrir. Eso provoca que tales situaciones no aparezcan casi nunca en los datos de entrenamiento, por lo que un sistema de aprendizaje supervisado errará estrepitosamente ante ellas.

Otro grave problema de estos sistemas es que, incluso cuando una red funciona correctamente y, por ejemplo, clasifica con acierto la imagen de un gato, nunca podemos estar seguros de que realmente haya detectado la presencia del animal. Tal vez haya localizado algún otro objeto que, en las imágenes de entrenamiento, aparecía con frecuencia junto a los felinos, como una pelota. Por tanto, a menudo ni siquiera los diseñadores de los sistemas de aprendizaje profundo saben con exactitud por qué la máquina funciona cuando acierta ni por qué falla cuando se equivoca. Este serio inconveniente, conocido como «problema de la caja negra», hace que sea prácticamente imposible explicar las decisiones que toman estos sistemas. Por ello, una línea de investigación muy activa hoy en día es la llamada «IA explicable», la cual persigue que las máquinas puedan explicar las decisiones que toman en un lenguaje que las personas logremos entender con facilidad. No basta con listar las operaciones matemáticas que ha efectuado la red.

Este último obstáculo afecta a la confianza que otorgamos a la IA. Es cierto que las personas tampoco podemos explicar siempre nuestras decisiones. Sin embargo, hay una diferencia fundamental: los humanos tendemos a confiar unos en otros porque creemos que los mecanismos de pensamiento de los de-

más son similares a los nuestros. Es lo que los psicólogos llaman tener una «teoría de la mente» sobre los demás. No obstante, ninguno de nosotros tiene una teoría de la mente sobre ninguna máquina, ni desde luego ninguna máquina la tiene sobre nosotros. Por ello, resulta perfectamente razonable exigir más explicaciones a una máquina que a una persona.

Ese problema de falta de confianza puede agravarse debido a lo sencillo que resulta engañar a una red neuronal. Para ello basta con modificar unos pocos píxeles en la imagen que el sistema debe reconocer; distorsiones imperceptibles para el ojo humano, pero que pueden provocar colosales errores de clasificación. Un ejemplo célebre lo hallamos en una fotografía de ImageNet que mostraba un autobús escolar. Tras ser mínimamente distorsionada, la imagen fue sorprendentemente clasificada como un avestruz.

A la vista de su enorme fragilidad y de su escasa relación con la visión y el aprendizaje humanos, resulta muy difícil entender por qué hoy en día existen tantas aplicaciones basadas en esta tecnología, como ya ocurre con el reconocimiento facial. En mi opinión, tales aplicaciones constituyen una falta absoluta de prudencia y de ética. Cuando los humanos vemos un objeto, vamos mucho más allá del objeto en sí: tenemos en cuenta el contexto en el que aparece, recordamos otras situaciones en que hemos visto objetos similares, sabemos para qué sirve, cómo se relaciona con otros elementos y con nosotros mismos, y un larguísimo etcétera imposible de enumerar. Sin todo ese «sentido común», los sistemas de visión artificial siempre serán frágiles y poco fiables.

Hoy por hoy, no existe ningún sistema de IA capaz de contextualizar y de hacer el tipo de inferencias básicas que incluso un niño realiza sin esfuerzo

Por ello, desde el punto de vista ético habría que adoptar una actitud de enorme prudencia con respecto a la IA. En este sentido, la *Declaración de Barcelona para un desarrollo y uso adecuados de la IA en Europa*, un documento elaborado en 2017 con el concurso de varios expertos, recomienda este principio de prudencia, entre otros aspectos.

JUEGOS DE TABLERO: INCAPACIDAD DE GENERALIZAR

Otra técnica de IA que ha ganado gran popularidad en los últimos años es el aprendizaje por refuerzo. Este enfoque se ha combinado con éxito con otros, en particular con las redes convolucionales profundas, para desarrollar programas que han aprendido a jugar al *backgammon*, a distintos juegos de Atari o incluso al go, llegando a superar a los mejores jugadores humanos. Esta combinación, conocida como «aprendizaje profundo por refuerzo» también ha contribuido de manera significativa a la reciente fiebre de la IA.

En este tipo de aprendizaje, un agente aprende a partir de las consecuencias de las acciones que ejecuta, ya sea sobre la base de su experiencia previa —si la tiene— o de una selección aleatoria de las acciones que puede tomar en cada situación, o «estado». El agente recibe un valor numérico (refuerzo) que codifica el éxito o el fracaso, y su objetivo consiste en seleccionar aquellas acciones que maximicen el refuerzo acumulado. En este caso no se trata de un aprendizaje supervisado, pues no se proporcionan ejemplos de pares estado-acción.

Un ejemplo de este proceso nos lo proporciona un ratón que debe aprender a recorrer un laberinto a cuya salida hay un trozo de queso, el cual servirá como recompensa. El punto de partida constituye el estado inicial del problema, la salida corresponde al estado final, y las situaciones entre uno y otro (cruces de pasillos y callejones sin salida) a los estados intermedios del problema. Al llegar a una encrucijada, el ratón ha de tomar la decisión de qué ruta seguir. Dado que al principio el animal no conoce el resultado de las posibles acciones (tomar un camino u otro al llegar a una cruce, por ejemplo), la manera de hallar la salida consiste en aprender el camino; es decir, a asociar acciones con estados. El animal comenzará con una estrategia de ensayo y error que le hará recorrer el laberinto de forma aleatoria. Cuando llegue a la salida y encuentre la recompensa, la acción que le condujo hasta allí desde el penúltimo estado recibirá un valor de refuerzo elevado. Este se propagará a su vez hasta la acción que le condujo desde el antepenúltimo estado hasta el penúltimo, y así sucesivamente.

Tras un elevado número de intentos, el algoritmo de aprendizaje por refuerzo converge a unos valores que siempre conducen al resultado deseado de manera eficiente. Las variaciones y extensiones de estos algoritmos son múltiples. Una de ellas fue la que sirvió de base a la máquina AlphaGo Zero, que en 2017 aprendió a jugar al go practicando contra sí misma y acabó alcanzando el máximo nivel tras jugar millones de partidas. En este caso, los estados corresponden a las posiciones de las piedras en el tablero, y las acciones son los movimientos reglamentarios asociados a cada una.

Una extensión importante de estos algoritmos es la que permite que el agente solo posea un conocimiento imperfecto del estado en el que se encuentra. Esto no ocurre en los juegos de tablero, donde la situación completa es perfectamente observable, pero sí constituye un problema en otros casos, como el de un robot móvil que ha de aprender a desempeñar tareas en un entorno físico. Por regla general, los sistemas de percepción no serán lo suficientemente precisos para determinar con total seguridad en qué posición se encuentra el robot ni dónde se hallan todos los objetos de su alrededor. Otra dificultad del aprendizaje por refuerzo es el compromiso entre aprovechar lo aprendido o seguir explorando —es decir, aprendiendo— con la esperanza de encontrar una estrategia mejor. Por último, el mayor problema de esta técnica reside en su escalabilidad. Cuando el número de estados y acciones posibles es muy elevado, el aprendizaje resulta extremadamente lento y hace falta extender los algoritmos con el concurso de otras técnicas.

Los juegos constituyen un excelente campo de aplicación para poner a prueba los algoritmos de aprendizaje. Pero ¿pueden ampliarse estas técnicas más allá de dicho ámbito? En otras palabras, ¿son realmente generales estos algoritmos? La verdad es que no mucho. AlphaZero, por ejemplo, una versión extendida de AlphaGo Zero que, además de al go, aprendió a jugar al ajedrez y al shogi (el «ajedrez japonés»), requería una red convolucional separada para cada uno de esos juegos y tuvo que ser entrenada desde cero para cada uno de ellos. Es decir, fue incapaz de aprovechar lo que había aprendido en un juego para transferirlo a otro; ni siquiera entre el shogi y el ajedrez, a pesar de su similitud. Esta imposibilidad de generalizar supone un elemento más que añadir a la larga lista de diferencias entre el aprendizaje artificial y el humano.

La facultad de transferir a una nueva tarea lo aprendido previamente en otra constituye un aspecto esencial del aprendizaje humano, así como de nuestra capacidad de generalizar y de razonar. Hoy, el aprendizaje por transferencia constituye un área de investigación muy activa en IA, ya que somos muchos quienes creemos que se trata de un paso importante hacia la IA general. Por ejemplo, en un trabajo cuyos resultados se publicaron en 2015, nuestro grupo de investigación enseñó a un robot a mantener en equilibrio un doble péndulo invertido. Después, un sistema de aprendizaje por transferencia trasladó ese conocimiento a un segundo robot que debía aprender a caminar. Aunque esta última máquina también podía aprender a andar sin saber cómo equilibrar el péndulo, disponer de tales conocimientos aceleró de manera significativa el proceso. Con todo, los resultados en esta área de investigación son todavía incipientes.

También aquí los diseñadores han de invertir enormes esfuerzos. Además, hablamos de inteligencias artificiales específicas, que operan en entornos limitados y que solo ejecutan tareas muy bien definidas, lo que las inhabilita para llevar a cabo acciones que nosotros ejecutamos sin apenas esfuerzo. A modo de ejemplo, pensemos en un robot doméstico que tuviese que aprender a cargar un lavavajillas. La variedad de objetos que tendría que reconocer, incluso solo en la cocina, es enorme. Y no todos irían al lavavajillas, ya que además de platos, vasos o cubiertos, en la mesa puede haber servilletas, teléfonos móviles, periódicos o restos orgánicos. También puede haber enseres que sí deban ir al lavavajillas pero que no estén encima de la mesa, sino apilados en el fregadero, por lo que no todos serán visibles. Como consecuencia, resulta prácticamente imposible enumerar a priori todos los estados en que puede hallarse el sistema o las diferentes acciones que habría de ejecutar en cada uno. De hecho, incluso predecir la fragilidad de un objeto solo con verlo constituye un problema aún sin resolver, por lo que la manipulación de todos esos utensilios tendría que hacerse con mucho tiento si no queremos tener que comprar miles de piezas de vajilla para el entrenamiento.

Todas estas dificultades impiden que un robot pueda aprender semejante tarea en una cocina real. En su lugar, debería hacerlo en una cocina simulada con realidad virtual. Pero una vez más, un simulador de un entorno tan complejo como una cocina debería tener en cuenta las propiedades físicas de cada objeto, cómo se comporta en cada situación posible según la ley de la gravedad, así como contemplar situaciones inesperadas, como que un niño entre corriendo mientras el robot lleva a cabo su tarea. Hoy por hoy, absolutamente nadie en el campo de la IA sabe cómo resolver estos problemas, ni siquiera en el caso de un entorno tan limitado como una cocina.

PROCESAMIENTO DEL LENGUAJE; NI CONTEXTO NI SEMÁNTICA

Por último, otro ámbito de la IA conocido por sus espectaculares progresos es el del procesamiento del lenguaje natural. El uso de las llamadas «redes neuronales recurrentes profundas» ha permitido grandes avances tanto en traducción automática como en asistentes personales capaces de responder a preguntas formuladas por el usuario.

Al contrario que las redes convolucionales, cuya matriz de entrada tiene un tamaño prefijado determinado por el número de píxeles, estas redes pueden procesar secuencias de datos de longitud variable, que, en el caso del lenguaje, corresponden a secuencias ordenadas de palabras. Las neuronas de cada una de sus capas no solo están conectadas a las capas anterior y posterior, sino también entre ellas. En un instante dado, una neurona calcula su grado de activación dependiendo de las señales que recibe de la capa anterior, pero también de las que en el instante previo le proporcionaron otras neuronas de su misma capa. Esto añade una cierta «memoria», gracias a la cual la red puede relacionar cada palabra con la precedente.

Al igual que ocurría con el caso de las imágenes, también el procesamiento automático del lenguaje requiere convertir primero las palabras en números. Esto se logra transformándolas en vectores de números reales, de tal manera que dos vectores asociados a palabras que estadísticamente aparezcan juntas en muchos textos estén también cercanos entre sí (dado que se trata de vectores numéricos, siempre es posible definir una distancia entre ellos). Dicho espacio de vectores es multidimensional, ya que una misma palabra puede tener diferentes significados en función del contexto. Por ejemplo, el vector asociado a la palabra *banco* estará cerca del correspondiente a *asiento* en una de las dimensiones, pero cerca del asignado a *caja de ahorros* en otra. Sin embargo, los vectores asociados a *asiento* y a *caja de ahorros* estarán alejados entre sí.

Este tipo de representación ha permitido mejorar las prestaciones de los sistemas de procesamiento del lenguaje natural hasta el punto de dar lugar a declaraciones como estas:

El nuevo servicio de Google traduce idiomas casi tan bien como las personas

—*MIT Technology Review*, 27 de septiembre 2016

Watson, de IBM, ya habla con fluidez nueve idiomas (y subiendo)

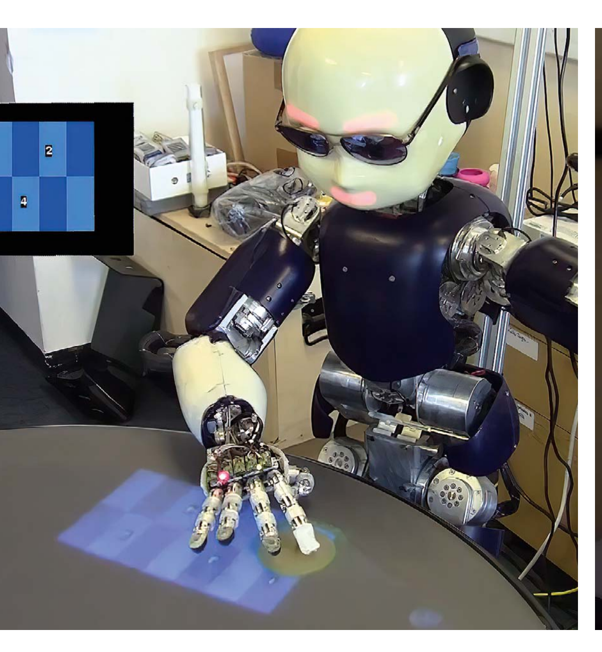
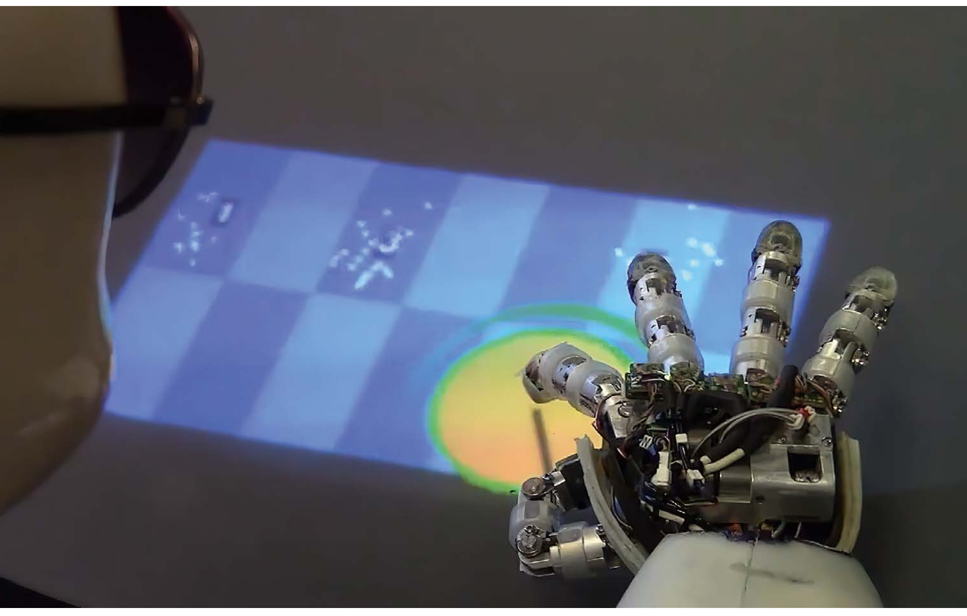
—*Wired*, 6 de octubre 2016

«Nuestras redes neuronales han desarrollado un asombroso sentido de la comprensión»

—Gereon Frahling, presidente de la compañía de traducción automática DeepL, 20 de marzo 2018

Estas afirmaciones responden a algunos estudios comparativos con traducciones humanas. Dado que un mismo texto puede admitir varias traducciones, todas ellas correctas, se pidió a un grupo de personas bilingües que evaluaran la calidad de cientos de frases traducidas tanto automáticamente como por traductores humanos profesionales. A continuación, calcularon la media aritmética de las notas con que cada evaluador había calificado los dos tipos de traducciones, y calcularon una media global, que era la media de las medias de cada evaluador, tanto para las traducciones automáticas como para las humanas.

La primera observación es que todos sabemos que las medias son engañosas: si la mitad de las traducciones son malas y la otra mitad muy buenas, el resultado global será que las traducciones son bastante buenas. Sin embargo, sería claramente preferible un sistema que proporcionara siempre traducciones bastante buenas y que no hiciera nunca traducciones pésimas. Otra crítica es que se trataba de traducir frases aisladas, no párrafos extensos, donde el análisis del discurso desempeña un papel fundamental para traducir correctamente. También hay que añadir que el corpus usado estaba formado por frases extraídas de noticias y de entradas en Wikipedia, las cuales suelen estar escritas evitando al máximo las ambigüedades.

¿MENTE SIN CUERPO? Un número creciente de investigadores consideran que el objetivo de una inteligencia artificial general solo será posible en máquinas dotadas de un cuerpo que les permita interaccionar con el entorno, con el fin de aprender a partir de dichas interacciones. En 2015, un grupo de investigación del Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial de Barcelona demostró que un robot iCub (*imagen*) podía aprender a relacionar posiciones de dedos (causas) con sonidos de notas (efectos) interactuando con un teclado musical virtual. Una vez aprendidas dichas relaciones, el robot fue capaz de reproducir secuencias de notas de forma robusta.

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL/CSIC

Pero incluso cuando un sistema como Google Translate nos proporciona una traducción estupenda, no lo hace mediante un análisis semántico profundo. De forma similar a lo que ocurre con la clasificación de imágenes, lo consigue a partir de cálculos matriciales gracias a haberse entrenado con un corpus de millones de frases traducidas correctamente. Si hubiera comprensión semántica, estos sistemas deberían poder inferir una gran cantidad de relaciones que los facultarían para responder preguntas incluso cuando la respuesta no aparece explícitamente en el texto. Para entenderlo, consideremos el siguiente fragmento:

Juan no tenía dinero en efectivo. Era viernes. Después de cenar tomó la tarjeta y fue al único cajero que hay en su pueblo. Introdujo la tarjeta, pero el cajero no funcionaba y se la tragó. Mientras caminaba hacia su casa, se encontró con un amigo y fueron al bar del pueblo a tomar una cerveza. Cayó más de una, y cuando volvió a casa estaba bastante alegre.

Cualquier persona reconocerá fácilmente los siguientes hechos no explicitados en el texto: se trata de una tarjeta bancaria; un cajero es una máquina que dispensa dinero; Juan no consiguió sacar efectivo; debe vivir en un pueblo muy pequeño; su amigo pagó las cervezas o, tal vez, al ser un pueblo muy pequeño los dueños del bar le conocían y le fiaron; los bares ofrecen bebidas a cambio de dinero; la cerveza es una bebida alcohólica; el alcohol puede producir euforia en las personas; bebió un poco más de lo debido; volvió a casa bien entrada la noche y sin la tarjeta; no la pudo recuperar antes del lunes; etcétera. Por tanto, cualquiera de nosotros podría responder numerosas preguntas relativas a, entre otras cosas, la tarjeta, el cajero, el pueblo, el dinero o los efectos del alcohol.

Hoy por hoy no existe ningún sistema de procesamiento automático del lenguaje capaz de hacer estas inferencias. Para que una máquina pueda deducir todo lo anterior necesitaría disponer de una enorme cantidad de conocimientos de sentido común que nosotros adquirimos casi sin esfuerzo a lo largo de la vida. Así pues, no resulta sorprendente que la comprensión profunda del lenguaje natural constituya uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la IA. El lenguaje no solo es ambiguo y dependiente del contexto, sino que presupone una gran cantidad de conocimientos generales. Incluso en el reconocimiento del habla, el ámbito en el que posiblemente haya habido más progresos, la falta de comprensión es manifiesta. Es conocido el caso del usuario de Siri que le dijo: «Siri, apunta lo siguiente en la lista de la compra». A lo que Siri respondió: «"Lo siguiente", apuntado en la lista de compra».

Es cierto que la transcripción de voz a texto sí funciona bien, pues hoy estas aplicaciones llegan a transcribir correctamente hasta el 95 por ciento de las palabras pronunciadas. No obstante, ello se debe a que para identificar fonemas no es necesario comprender el significado de las palabras. Y tales porcentajes se logran solo en entornos con muy poco ruido de fondo. Con bullicio, la tasa de acierto cae de manera drástica.

Así pues, y a pesar de los éxitos del aprendizaje profundo aplicado al procesamiento del lenguaje, vemos que, contrariamente a lo que ha llegado a afirmarse, seguimos estando muy lejos del nivel humano. La razón de dichas exageraciones seguramente obedece a la feroz competencia entre empresas para hacerse con la parte más grande de un pastel, el de la traducción y los asistentes personales, extremadamente lucrativo. Y aunque aún falte mucho para lograr traducciones automáticas de calidad similar a las de un humano profesional, no cabe duda de que una herramienta como Google Translate resulta muy útil si no somos muy exigentes con el resultado; por ejemplo, cuando nos basta con tener una idea aproximada del contenido de un texto redactado en un idioma que ignoramos por completo. Pero si

somos un poco más estrictos, siempre es necesario un trabajo de edición posterior para corregir los errores que inevitablemente cometen los traductores automáticos y que tan a menudo nos hacen sonreír.

Conversar con máquinas de forma robusta en lenguaje natural y sobre una amplia diversidad de temas sigue siendo, por tanto, una meta muy lejana. Y no parece que vaya a llegar de la mano de técnicas que se basen exclusivamente en analizar enormes cantidades de datos sin una comprensión real del lenguaje; en otras palabras: sin atacar el problema de cómo dotar a las máquinas de sentido común.

EL PROBLEMA DEL SENTIDO COMÚN

Dediquemos unas líneas a explicar a qué nos referimos cuando hablamos de sentido común. Esta clase de conocimiento se adquiere en las primeras etapas de nuestra vida. Por ejemplo, cualquier niño pequeño sabe que, para mover un tren de juguete atado a una cuerda, hay que tirar de la cuerda, no empujarla. O también que un objeto inanimado no cambiará de posición a menos que alguien lo mueva directamente. Para adquirir tales conocimientos hay que entender entre otras cosas las relaciones de causa y efecto, así como ser capaces de razonar sobre ellas. Los niños aprenden también muy pronto que hay situaciones que enojan a sus padres, lo que implica que tienen un modelo mental de los demás y que pueden razonar sobre dichos modelos mentales.

Judea Pearl y Adnan Darwiche, expertos en IA de la Universidad de California en Los Ángeles, han subrayado que las técnicas actuales de aprendizaje profundo detectan correlaciones, pero no relaciones de causa y efecto. Por ejemplo, no pueden aprender que es la salida del sol lo que provoca el canto del gallo, y no al revés. Estos investigadores han argumentado a favor de cierto tipo de modelos para integrar en las máquinas las relaciones de causa y efecto. Se trata de un enfoque de enorme interés, puesto que combina razonamiento y aprendizaje; un paso que, en mi opinión, resultará imprescindible para progresar hacia la IA general. En los últimos años se han propuesto otras técnicas para integrar razonamiento y aprendizaje, como las que plantean añadir memoria y capacidad de razonamiento a las redes neuronales. Estas tendencias son una buena noticia, ya que parecía que la comunidad de IA había renunciado a responder a una pregunta clave en toda actividad científica: la pregunta del porqué.

Con el éxito del aprendizaje profundo, muchos investigadores e ingenieros parecían haber olvidado que, en última instancia, lo importante es preguntarse por qué algo funciona, no conformarse con el hecho de que funcione. Si la IA específica ya permite desarrollar sistemas de reconocimiento visual, traducción automática y asistentes personales, que, además, son extremadamente lucrativos, ¿por qué deberíamos preocuparnos por la IA general? La respuesta es doble. Por un lado, por el fin puramente científico de entender de una vez por todas qué es la inteligencia. Por otro, por el hecho práctico de que la IA general nos permitirá desarrollar aplicaciones mucho mejores y más útiles.

Las máquinas «inteligentes» actuales constituyen un ejemplo de lo que el filósofo de la mente Daniel Dennet llama «habilidad sin comprensión». Y, de hecho, creo que esta podría ser incluso una buena definición de lo que es la propia IA hoy en día: «El área de la computación que consiste en dotar a las máquinas de habilidades sin capacidad de comprender». Otro filósofo, John Searle, señaló hace cuarenta años la imposibilidad de que los sistemas de IA basados en la mera manipulación sintáctica de símbolos lleguen a entender nada. Su argumento, hoy famoso, se conoce con el nombre de la «habitación china». El propio Searle lo resumió en estos términos:

Supongamos que un angloparlante que no tiene ni idea de chino se encierra en una habitación en la que dispone de un conjunto muy completo de reglas, escritas en inglés, sobre cómo manipular caracteres chinos y cómo generar otros a partir de tales manipulaciones. A continuación, desde el exterior se le proporcionan una serie de caracteres en ese idioma y él, aplicando las reglas mencionadas, procede a transformarlos en otros caracteres chinos que devuelve al exterior, de manera que estos resulten ser respuestas a los caracteres de entrada indistinguibles de las que daría alguien que habla chino con fluidez.

Searle afirma que esta «habitación china» (el sistema formado por la persona que no habla chino, por las reglas de transformación de símbolos y por los símbolos objeto de manipulación) no entiende chino, puesto que lo único que está haciendo es una manipulación puramente sintáctica; es decir, sin consideraciones semánticas. Searle fue, y todavía es, muy criticado por la comunidad de IA. Pero, en mi opinión, el tiempo le ha dado la razón y hoy podemos decir que, efectivamente, la habitación china no entiende el chino, de igual modo que Google Translate no entiende los textos que traduce.

La IA actual podría definirse como «la disciplina que consiste en dotar a las máquinas de habilidades sin capacidad de comprender»

CUERPO E INTELIGENCIA GENERAL

Con anterioridad a los éxitos de las redes neuronales profundas, el modelo dominante en IA había sido el simbólico. Este tiene sus raíces en la hipótesis conocida como «sistema de símbolos físicos» (SSF), formulada en 1975 por Allen Newell y Herbert Simon en su ponencia de recepción del premio Turing, considerado el galardón de mayor prestigio en las ciencias de la computación.

Por «sistema de símbolos físicos» Newell y Simon se referían a un conjunto de entidades (símbolos) que, mediante una serie de reglas, pueden combinarse para formar estructuras mayores y transformarse en otras. Tales procedimientos permiten crear símbolos nuevos, generar y modificar las relaciones entre ellos, almacenarlos, determinar si dos símbolos son iguales o no, etcétera. Tales símbolos son además físicos, en el sentido de que tienen un sustrato material (electrónico, en el caso de los ordenadores, o químico-biológico, en el de los humanos). Según la hipótesis de Newell y Simon, todo sistema de símbolos físicos posee los medios necesarios y suficientes para llevar a cabo acciones inteligentes. Por otra parte, dado que los humanos somos capaces de mostrar conductas inteligentes, también nosotros deberíamos ser sistemas de símbolos físicos. Por último, la naturaleza del sustrato (electrónica o biológica) carece de importancia: un sistema puede ser inteligente siempre y cuando dicho sustrato le permita procesar símbolos.

No olvidemos que se trata de una hipótesis, por lo que no debe ser aceptada ni rechazada a priori, sino evaluada de acuerdo con el método científico. También es importante matizar que en ningún momento Newell y Simon limitaron su hipótesis a que el procesamiento de símbolos debiera ser únicamente sintáctico, por lo que su validez no contradiría el argumento de Searle de que la habitación no entiende chino. En mi opinión, el objetivo científico de la IA general no es otro que intentar demostrar esta hipótesis en el contexto de los ordenadores. Es decir, averiguar si una computadora convenientemente programada es capaz de mostrar una conducta inteligente de tipo general.

El modelo simbólico sigue siendo muy importante hoy en día, y de hecho se considera el modelo «clásico» en IA. Puede calificarse como un modelo que opera «de arriba abajo» (*top-down*), puesto que trabaja con representaciones abstractas del mundo, las cuales se procesan mediante lenguajes basados principalmente en la lógica matemática y sus extensiones. Las redes neuronales, en cambio, constituyen una modelización «de abajo arriba» (*bottom-up*), basada en la hipótesis de que la inteligencia emerge a partir de la actividad distribuida de un gran número de unidades interconectadas (las neuronas artificiales). Estos sistemas no son incompatibles con la hipótesis del SSF, ya que, al fin y al cabo, también procesan símbolos. Sin embargo, estos no son explícitos, sino que se encuentran repartidos por toda la red. Por esta razón, la IA simbólica permite explicar con mayor facilidad el funcionamiento de las máquinas, ya que, al contar con símbolos explícitos, es posible analizar cómo estos intervienen en el proceso de razonamiento, algo irrealizable con las redes neuronales actuales.

Con todo, ni la IA simbólica ni la basada en redes neuronales requieren que el sistema disponga de un cuerpo situado en un entorno real. Una de las críticas más duras a estos modelos «no corpóreos» se basa en el hecho de que, para muchos investigadores, un agente inteligente necesita un cuerpo que le permita tener experiencias directas con el entorno. No basta con que un programador le proporcione descripciones abstractas de ese entorno codificadas en un lenguaje de representación (como en el caso de la IA simbólica) o millones de datos de entrenamiento (como ocurre con las redes neuronales artificiales).

En mi opinión, en ausencia de un cuerpo, ni las representaciones abstractas de la IA simbólica ni el estado interno de una red neuronal artificial podrán adquirir contenido semántico para una máquina. En cambio, una interacción directa con el entorno permitiría que un agente con cuerpo, como un robot, relacionase las señales que captan sus sensores con las representaciones simbólicas generadas a partir de lo percibido con anterioridad. Hubert Dreyfus, filósofo de la Universidad de California en Berkeley, fue uno de los primeros en abogar por la necesidad de asociar la inteligencia a un cuerpo capaz de interactuar con el mundo. La idea es que la inteligencia de los seres vivos deriva del hecho de estar situados en un ambiente con el que pueden interaccionar. Según Dreyfus, la IA debería modelizar todos estos aspectos para alcanzar el objetivo de la IA general. Sin duda, se trata de una idea interesante que hoy en día compartimos cada vez más investigadores.

REPENSAR EL FUTURO

No puedo imaginar qué avances harán falta para construir una IA general corpórea, ni si dicho objetivo será nunca posible. Sin embargo, no deberíamos renunciar a él. Al fin y al cabo, son las grandes preguntas las que dan a la ciencia su razón de ser. Y la pregunta de si es posible lograr una IA general es de complejidad equiparable a otras grandes preguntas de la ciencia, como la relativa al origen de la vida o al inicio del universo.

¿Qué ocurrirá si algún día logramos la IA general? Stuart Russell, de la Universidad de California en Berkeley, ha argumentado en su reciente libro *Human compatible* que, en tal caso, será de vital importancia asegurar que las máquinas persigan los objetivos que realmente queremos, en lugar de ejecutar de manera inflexible comportamientos preprogramados claros pero incorrectos. Para ello, deberán aprender a entender nuestros deseos observando las decisiones que tomamos y comprendiendo por qué las tomamos. Según Russell, la solución pasará por introducir un margen de duda (incertidumbre) en las especificaciones de las máquinas. De esta forma, se verían obligadas a pedir aclaraciones a los humanos antes de tomar sus decisiones y, llegado el caso, permitirían que las desconectásemos.

Volviendo al presente, es innegable que los sistemas de IA actuales siguen sin comprender absolutamente nada. Al igual que el emperador del cuento de Andersen, hoy la IA continúa desnuda. Por tanto, deberíamos replantearnos con la máxima seriedad algunas de las aplicaciones que tan alegremente estamos desplegando. Me refiero al uso de algoritmos de reconocimiento facial o a los que pretenden predecir el futuro, como los que evalúan la probabilidad de reincidencia de un criminal para que un juez decida si concederle o no la libertad condicional. O lo que sería aún peor: aplicar la IA para desarrollar armas letales autónomas. ¿Somos conscientes de que estamos dejando decisiones clave en manos de artefactos estúpidos?

Lo que debería aterrorizarnos no es un futuro dominado por una hipotética IA superior. Dejemos esto para quienes creen en la singularidad y confunden la ciencia con la ciencia ficción. Lo que realmente debería preocuparnos es la situación presente, en la que estamos delegando cada vez más tareas en una IA tan limitada como la actual. Por ello, es necesario regular lo antes posible el desarrollo y uso de la IA. De lo contrario, acabaremos pagando un precio excesivamente alto.

PARA SABER MÁS

What computers still can't do: A critique of artificial reason. Hubert L. Dreyfus. MIT Press, 1992.
From bacteria to Bach and back: The evolution of minds. Daniel C. Dennet. Penguin Random House, 2018.
The Barcelona declaration for the proper development and usage of artificial intelligence in Europe. Luc Steels y Ramon López de Mántaras en *AI Communications*, vol. 31, págs. 485-494, diciembre de 2018.
Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. Cynthia Rudin en *Nature Machine Intelligence*, vol. 1, págs. 206-215, mayo de 2019.
Human compatible: Artificial intelligence and the problem of control. Stuart J. Russell. Viking, 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Es la mente un programa informático? John R. Searle en *IyC*, marzo de 1990. Reeditado para *La ciencia después de Alan Turing*, colección *Temas* de *IyC*, n.º 68, 2012.
El valor de la experiencia para los robots. Ramon López de Mántaras en *IyC*, agosto de 2016.
¿Hemos de temer a los robots superinteligentes? Stuart Russell en *IyC*, agosto de 2016.
A favor de los robots desobedientes. Gordon Briggs y Matthias Scheutz en *IyC*, marzo de 2017.
El problema de la caja negra. Davide Castelvecchi en *IyC*, abril de 2017.
Ética en la inteligencia artificial. Ramon López de Mántaras en *IyC*, agosto de 2017.
La IA, en manos privadas. Yochai Benkler en *IyC*, octubre de 2019.

FÍSICA TEÓRICA

EN BUSCA DE AGUJEROS BLANCOS

Los agujeros blancos, hipotéticos astros que expulsarían materia sin absorberla jamás, podrían ser el destino último de los agujeros negros. Su detección abriría una ventana a la gravedad cuántica

Carlo Rovelli



El 10 de abril de 2019, la humanidad pudo admirar por primera vez la imagen real de un agujero negro: una mancha negra rodeada de un brillante anillo deformado. Gracias a esta instantánea, obtenida por el Telescopio del Horizonte de Sucesos tras el tratamiento de los datos observacionales, disponemos de una prueba visible y directa de la existencia de estos objetos exóticos y extremos.



Carlo Rovelli es profesor de la Universidad de Aix-Marsella e investigador del Centro de Física Teórica de Luminy.

Aunque la realidad de los agujeros negros ya no ofrece dudas, los físicos tardaron en convencerse: durante decenios, estos astros constituyeron una especie de curiosidad matemática, una posible solución a las ecuaciones de la relatividad general de Einstein que no se correspondía con ningún objeto del cosmos. En su libro de 1972 *Gravitation and cosmology*, el futuro premio nóbel Steven Weinberg, de la Universidad de Texas en Austin, aún se refería a estos astros como «muy hipotéticos».

Sin embargo, los indicios de su existencia fueron acumulándose. En los años 70 del siglo pasado, los radioastrónomos detectaron fuentes de radiación electromagnética, como Sagitario A* en el centro de la Vía Láctea, que más tarde conectaron con los discos de gas y polvo caliente que se concentran en torno a los agujeros negros. Dos décadas después, la naturaleza de Sagitario A* se confirmó gracias a la observación de estrellas que se mueven en órbitas próximas al agujero negro. Eso permitió estimar que su masa es unos 4 millones de veces mayor que la del Sol. Más recientemente, los enormes interferómetros láser LIGO y Virgo han detectado ondas gravitacionales (vibraciones del espaciotiempo) cuya forma corresponde justo a la que producirían dos agujeros negros que se aproximasen en espiral hasta fusionarse [*véase* «La observación de ondas gravitacionales con LIGO», por Alicia M. Sintes y Borja Sorazu; Investigación y Ciencia, febrero de 2017].

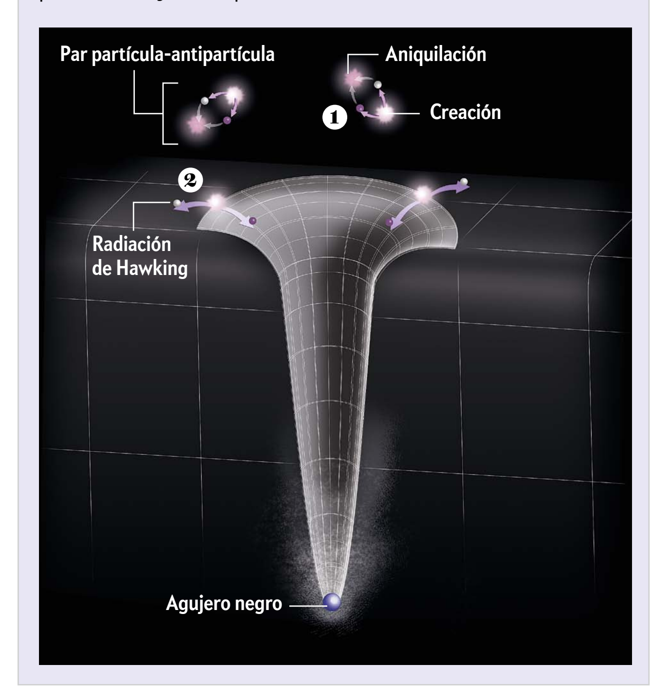
Esta historia podría repetirse con los agujeros blancos, astros tan sorprendentes y exóticos como los agujeros negros y que también corresponden a soluciones de las ecuaciones de la relatividad general. Podemos describirlos simplemente como agujeros negros que evolucionan a la inversa: una película de su vida sería como la de un agujero negro proyectada al revés, comenzando por el final. A pesar de esta diferencia, para un observador externo sería muy difícil distinguir un agujero blanco de uno negro: los dos poseen masa y un campo gravitatorio atractivo, de modo que ambos pueden mantener un disco de acreción y estar rodeados de objetos en órbita. Pero si viésemos salir un chorro de materia del agujero, sabríamos de inmediato que se trata de un agujero blanco.

RADIACIÓN DE HAWKING

Los agujeros negros se evaporan

La física cuántica implica que en el vacío tiene lugar una actividad frenética: aparecen espontáneamente pares partícula-antipartícula que vuelven a aniquilarse enseguida ❶. Esta violación temporal de la conservación de la energía es posible gracias al principio de incertidumbre de Heisenberg.

En 1974, Stephen Hawking señaló que si un par se crea justo fuera del horizonte de un agujero negro, puede que una de las partículas caiga en el agujero y la otra escape, con lo que ya no pueden aniquilarse ❷. Para un observador distante, el agujero negro parece emitir radiación, de modo que pierde masa y se evapora.



EN SÍNTESIS

Los agujeros blancos son soluciones de las ecuaciones de la relatividad general, igual que los agujeros negros. Mientras que nada puede escapar de un agujero negro, nada penetra en uno blanco.

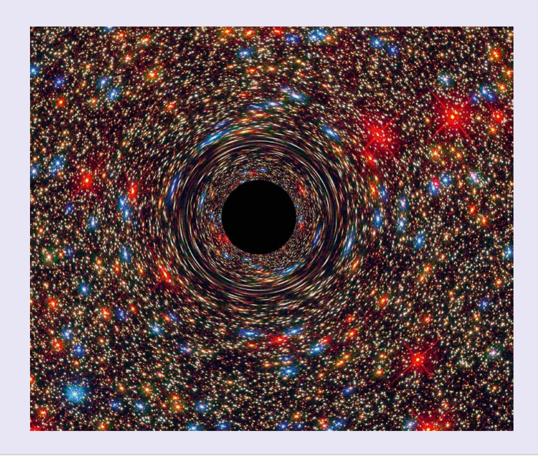
Según la gravedad cuántica de bucles, los agujeros negros podrían acabar transformándose en agujeros blancos y expulsando toda la materia y la información que han caído en su interior.

Aunque por el momento no hay ninguna prueba de la existencia de los agujeros blancos, se están examinando diversas ideas relacionadas con la materia oscura y los estallidos de radiación.

Las fronteras de los agujeros negros y blancos

El horizonte de sucesos define de manera rigurosa la frontera de un agujero negro: una vez que se cruza, ya no es posible escapar de la atracción gravitatoria del astro y volver al exterior. Esta definición es sencilla e inequívoca para agujeros negros estáticos y sin carga eléctrica, pero cuando consideramos situaciones más realistas (por ejemplo, agujeros que rotan), podemos definir más de un horizonte.

Y si hablamos de agujeros blancos, hay que invertir la definición: ahora la frontera señala el límite a partir del cual es imposible penetrar en el agujero. En este artículo hemos decidido hablar simplemente de «horizonte», sin entrar en más detalles.



Simulación de un agujero negro supermasivo. Más allá del horizonte de sucesos, nada (ni siquiera la luz) puede escapar, por lo que el agujero aparece oscuro.

NASA/ESA/D. COE, J. ANDERSON Y R. VAN DER MAREL, INSTITUTO PARA LA CIENCIA DEL TELESCOPIO ESPACIAL

La diferencia también sería evidente si una nave espacial se acercase al borde de uno de estos objetos. En el caso de un agujero negro, podría entrar, pero quedaría atrapada por el intenso campo gravitatorio y sería incapaz de volver a salir: ni siquiera la luz puede escapar del interior de un agujero negro (de ahí su nombre). En cambio, la nave nunca podría penetrar en un agujero blanco: al aproximarse se enfrentaría a un flujo de materia saliente y le haría falta una energía infinita para entrar en el astro.

LA MUERTE DE UNA ESTRELLA

Sabemos cómo pueden surgir los agujeros negros. Por ejemplo, cuando una estrella muy masiva llega al final de su vida, su combustible se agota y se derrumba bajo su propio peso. Entonces se produce una gigantesca explosión de supernova que proyecta las capas externas de la estrella al medio interestelar, mientras que el núcleo se comprime y se vuelve tan denso que forma un agujero negro, delimitado por un «horizonte» que marca la frontera a partir de la cual ya no es posible escapar.

Por el contrario, resulta muy difícil imaginar cómo podrían formarse los agujeros blancos, y de ahí las dudas sobre su existencia. Como hizo Weinberg con los agujeros negros, el eminente especialista en relatividad general Robert Wald, de la Universidad de Chicago, escribió en 1984 en su libro *General relativity* que no había argumentos para pensar que existiesen los agujeros blancos.

No obstante, algunos físicos estamos empezando a considerar seriamente esa posibilidad: los agujeros negros podrían morir y convertirse en blancos, con lo que la materia y energía caídas en el agujero negro resurgirían del agujero blanco. Esta idea surge de manera natural en la teoría en la que trabajo, la gravedad cuántica de bucles, y da respuesta a dos cuestiones fundamentales que los físicos tratan de dilucidar desde hace decenios.

La primera es qué ocurre en el centro de un agujero negro. Las observaciones astronómicas revelan que hay grandes cantidades de materia cayendo en espiral sobre estos astros. Toda esa materia continúa su caída hacia el centro del agujero, pero ¿puede acumularse allí sin límite?

La segunda pregunta es qué sucede cuando un agujero negro llega al final de su vida. En la década de 1970, Stephen Hawking demostró que los agujeros negros emiten radiación (la llamada radiación de Hawking), por lo que van perdiendo lentamente su masa hasta hacerse muy pequeños. ¿Y qué pasa entonces? Nadie lo sabe.

La relatividad general de Einstein explica muy bien nuestras observaciones de los agujeros negros, pero no basta para resolver estos dos interrogantes. Dicha teoría describe la dinámica de la materia y del espaciotiempo: la materia se desplaza de acuerdo con la geometría del espaciotiempo, mientras que este se deforma en presencia de la materia. Así pues, el espaciotiempo no es un marco inerte donde se inscribe la realidad: su geometría variable determina los movimientos de la materia, de tal modo que es posible interpretarlos como el resultado de una fuerza gravitatoria. Por ejemplo, alrededor nuestro la geometría del espaciotiempo está curvada por la Tierra, y eso es lo que nos hace caer hacia ella.

Einstein formuló la versión definitiva de su teoría en 1915 y pocos meses después, para su sorpresa, el físico y matemático alemán Karl Schwarzschild encontró una solución exacta de sus ecuaciones. Esta solución describe la geometría del espaciotiempo en torno a un cuerpo esférico, como una estrella o la Tierra, pero sus implicaciones físicas no acabaron de entenderse hasta varios decenios después. Y es que si la masa del astro se concentra en una región cuyo radio es menor que el llamado radio de Schwarzschild, suceden cosas muy extrañas.

La situación se fue aclarando poco a poco gracias al británico Arthur Eddington y, sobre todo, al americano David Finkelstein: cuando la masa se encuentra dentro del volumen definido por el radio de Schwarzschild, tenemos un agujero negro. La superficie correspondiente a dicho radio es el horizonte del agujero negro y representa el punto de no retorno para todo lo que caiga en él. En los últimos años, los observatorios de ondas gravitacionales y el Telescopio del Horizonte de Sucesos [*véase* «La prueba del agujero negro», por Dimitrios Psaltis y Sheperd S. Doeleman; Investigación y Ciencia, noviembre de 2015] nos han proporcionado muchas pruebas empíricas de que la solución de Schwarzschild constituye una buena descripción de la realidad.

UNA SINGULARIDAD MOLESTA

La solución de Schwarzschild no nos dice qué ocurre en el centro del agujero negro ni en el futuro lejano. La materia que cruza el horizonte continúa cayendo y, de acuerdo con la

relatividad general, se acumula en el centro del astro. Allí la densidad se hace infinita y surge una singularidad que marcaría el fin de la realidad y donde todo, incluso el propio tiempo, dejaría de existir.

Sin embargo, esta predicción tan extrema seguramente es errónea, puesto que al acercarnos al centro de un agujero negro abandonamos el dominio de validez de la relatividad general. En la región central, la gravedad es tan intensa que ya no es posible ignorar los efectos cuánticos, en concreto los que experimenta el espaciotiempo. Para comprender lo que pasa en el corazón de un agujero negro, necesitamos una teoría cuántica de la gravedad.

Tener en cuenta los efectos cuánticos en las inmediaciones de la singularidad debería servir para eliminar los infinitos de las magnitudes físicas y, en consecuencia, la propia singularidad. La mecánica cuántica ha resuelto varios problemas de este tipo. Por ejemplo, a comienzos del siglo xx, la descripción clásica del átomo sugería que un electrón en órbita iría perdiendo energía y caería en espiral hasta chocar con el núcleo, una inestabilidad que habría impedido que existieran los átomos. Pero la física cuántica impone que, en el átomo, la energía de los electrones está cuantizada: solo puede tomar determinados valores a partir de un valor mínimo, y eso impide que dichas partículas se precipiten sobre el núcleo.

¿En qué se convertiría la singularidad del agujero negro en el contexto de una teoría cuántica de la gravedad? Estamos lejos de conocer la respuesta, porque aún no disponemos de una teoría semejante que suscite consenso. Los físicos teóricos estudian sobre todo dos vías. La primera es la teoría de cuerdas, basada en la premisa de que las partículas fundamentales no son objetos puntuales, sino pequeñas cuerdas vibrantes. La segunda (la que nos interesa aquí) es la gravedad cuántica de bucles, que postula que el propio espaciotiempo está sometido a los fenómenos cuánticos.

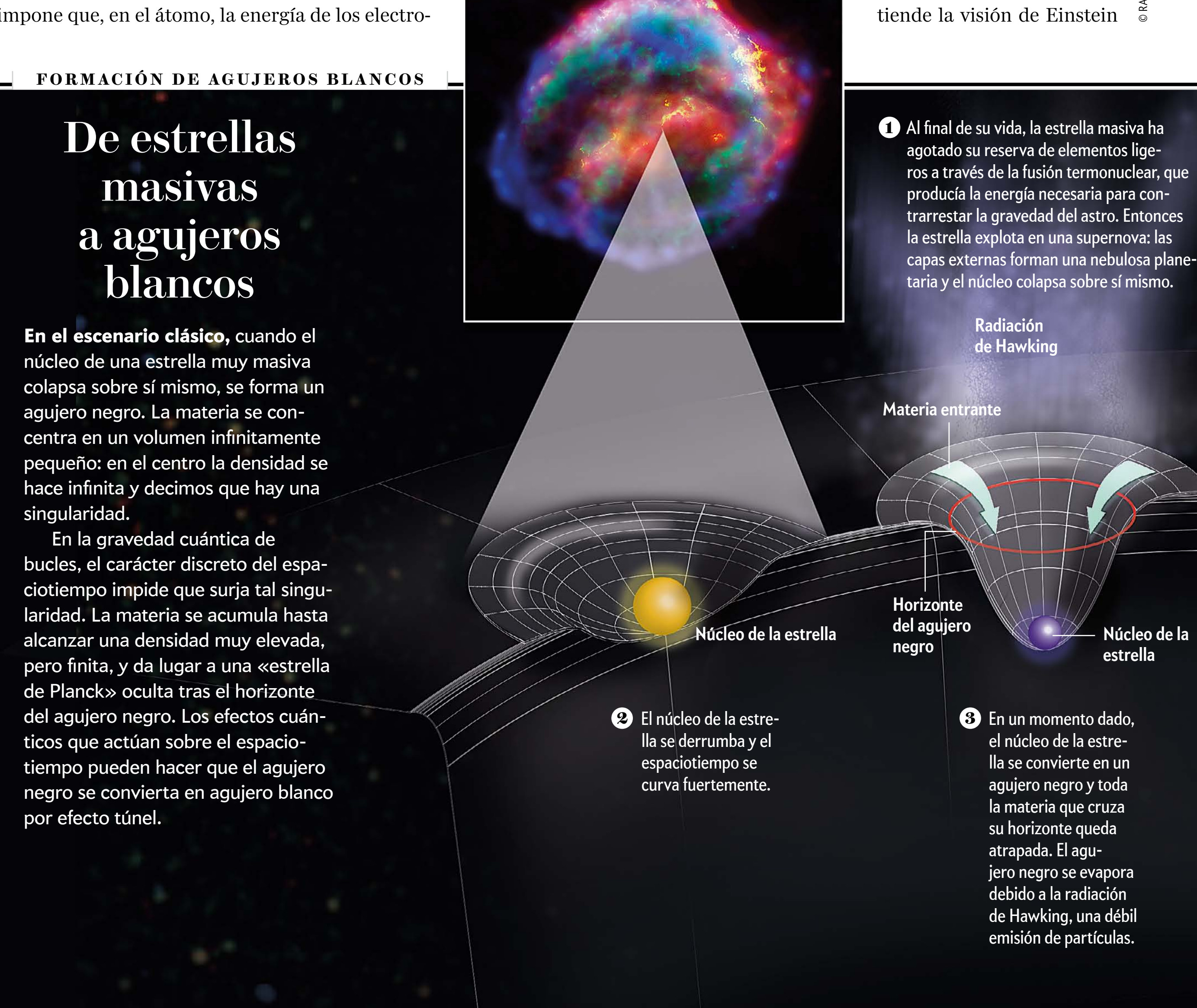
Con la teoría de la relatividad general, Einstein demostró que el espaciotiempo no es un escenario inmóvil donde evoluciona el universo, sino que él mismo participa en esa evolución. El espaciotiempo no solo dicta el movimiento de la materia, también reacciona a su presencia curvándose, dilatándose o contrayéndose. La gravedad cuántica de bucles extiende la visión de Einstein

FORMACIÓN DE AGUJEROS BLANCOS

De estrellas masivas a agujeros blancos

En el escenario clásico, cuando el núcleo de una estrella muy masiva colapsa sobre sí mismo, se forma un agujero negro. La materia se concentra en un volumen infinitamente pequeño: en el centro la densidad se hace infinita y decimos que hay una singularidad.

En la gravedad cuántica de bucles, el carácter discreto del espaciotiempo impide que surja tal singularidad. La materia se acumula hasta alcanzar una densidad muy elevada, pero finita, y da lugar a una «estrella de Planck» oculta tras el horizonte del agujero negro. Los efectos cuánticos que actúan sobre el espaciotiempo pueden hacer que el agujero negro se convierta en agujero blanco por efecto túnel.



1 Al final de su vida, la estrella masiva ha agotado su reserva de elementos ligeros a través de la fusión termonuclear, que producía la energía necesaria para contrarrestar la gravedad del astro. Entonces la estrella explota en una supernova: las capas externas forman una nebulosa planetaria y el núcleo colapsa sobre sí mismo.

2 El núcleo de la estrella se derrumba y el espaciotiempo se curva fuertemente.

3 En un momento dado, el núcleo de la estrella se convierte en un agujero negro y toda la materia que cruza su horizonte queda atrapada. El agujero negro se evapora debido a la radiación de Hawking, una débil emisión de partículas.

a la realidad cuántica del mundo: los conceptos cuánticos relacionados con las partículas también son aplicables al espaciotiempo.

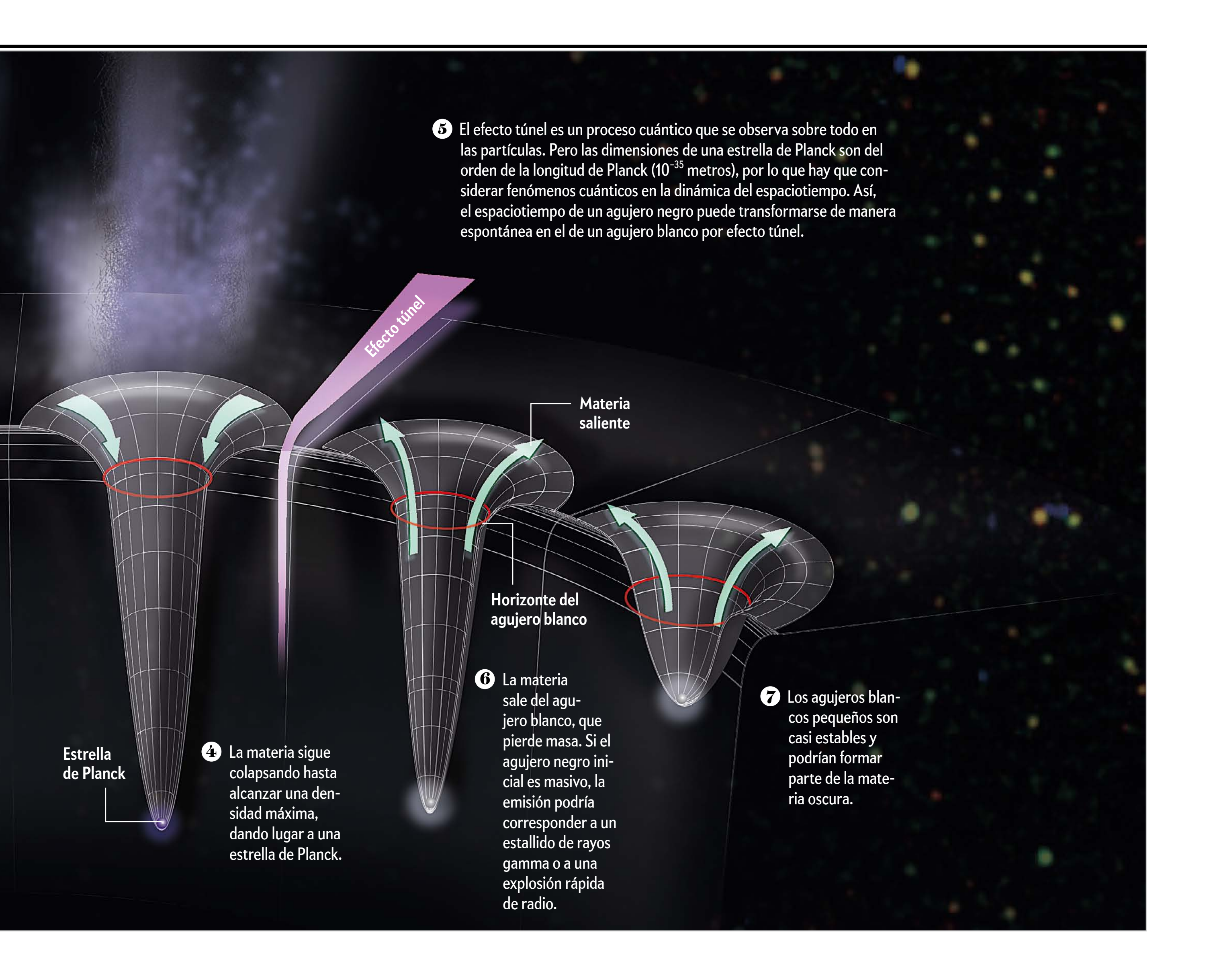
ESPACIOTIEMPO DISCRETO

La gravedad cuántica de bucles se desarrolló a partir de los años 1980. Los físicos comenzaron por reformular la relatividad general para que se pareciera a una teoría del electromagnetismo, ya que conocemos un procedimiento para convertir una teoría clásica como la del electromagnetismo en una teoría cuántica. Los bucles de la nueva teoría son análogos a las líneas de fuerza de los campos eléctrico y magnético. Y la formulación cuántica de las líneas de fuerza de la gravedad implica que el espacio está discretizado, compuesto de minúsculos elementos individuales, o «cuantos».

A gran escala, el entramado es tan tupido que el espaciotiempo se presenta como un continuo, cuya evolución viene descrita por las leyes de la relatividad general. Sin embargo, cuando la densidad de energía es muy alta, como en el centro de un agujero negro, ya no podemos ignorar la estructura discreta del espaciotiempo, y las predicciones de la gravedad cuántica de bucles difieren de las de la relatividad general clásica.

Una consecuencia de esta discretización del espaciotiempo es que no puede existir una singularidad, un volumen infinitamente pequeño con una densidad infinita. En 2014, Francesca Vidotto (actualmente en la Universidad de Ontario Occidental) y yo estudiamos la posibilidad de que la materia que colapsa en el interior de un agujero negro forme un objeto de un cierto tamaño mínimo y con una densidad extrema pero finita: una estrella de Planck. La gravedad cuántica ejerce una presión suficiente para impedir que el colapso de la materia prosiga y dé lugar a una singularidad. La densidad de la estrella de Planck sería la máxima que es posible alcanzar.

Pero ¿qué sucedería después con la materia que continúa cayendo en el agujero negro? Solo podría hacer una cosa: rebotar. Este escenario parece contradecir la visión clásica de un agujero negro, según la cual (por definición) todos los objetos han de caer hacia el centro. Pero, en el centro del agujero negro, los efectos cuánticos no solo actúan sobre la materia, sino también sobre el propio espaciotiempo. La gravedad cuántica permite que el espaciotiempo del agujero negro rebote, de modo que la geometría puede cambiar y dar lugar a una nueva región del espaciotiempo con características distintas a las del agujero negro.



EL DESTINO DE LOS AGUJEROS NEGROS

En colaboración con Hal Haggard, del Colegio Bard de Nueva York, demostré que (en contra de lo que se pensaba anteriormente) las ecuaciones de la relatividad general de Einstein son compatibles con la posibilidad de que un agujero negro se convierta en uno blanco, tras pasar por una breve fase cuántica. Para comprender mejor lo que ocurre, consideremos la trayectoria de una pelota que cae al suelo. El rebote parece una caída vista al revés, y lo mismo pasa con un agujero blanco: este objeto sería el *alter ego* de un agujero negro, pero observado con el tiempo fluyendo en sentido opuesto.

Uno de los primeros físicos en estudiar el interior de los agujeros negros fue el irlandés John Lighton Synge, en la década de 1930, pese a que la noción de agujero negro aún no estaba clara por aquel entonces. Synge demostró que, con un pequeño ajuste de las ecuaciones de la relatividad general, era posible extender la geometría de un agujero negro y conectarla con la de un agujero blanco. La gravedad cuántica de bucles confirma que la mecánica cuántica permite realizar tal ajuste.

¿Dónde se encuentra el agujero blanco producido por un agujero negro? ¿Está muy lejos? ¿Se halla conectado al agujero negro por un agujero de gusano en el tejido del espaciotiempo? ¿O está incluso en un universo distinto? Nada tan espectacular. El agujero blanco está en el mismo lugar que el agujero negro, solo que en su futuro. Es difícil representar cómo evoluciona el espaciotiempo en el interior del astro durante esta transición, pero todo es muy sencillo visto desde el exterior: en la primera parte de su vida, el agujero es negro y la materia cae en él sin oportunidad de escapar; tras la transición cuántica, el agujero es blanco y la materia solo puede salir.

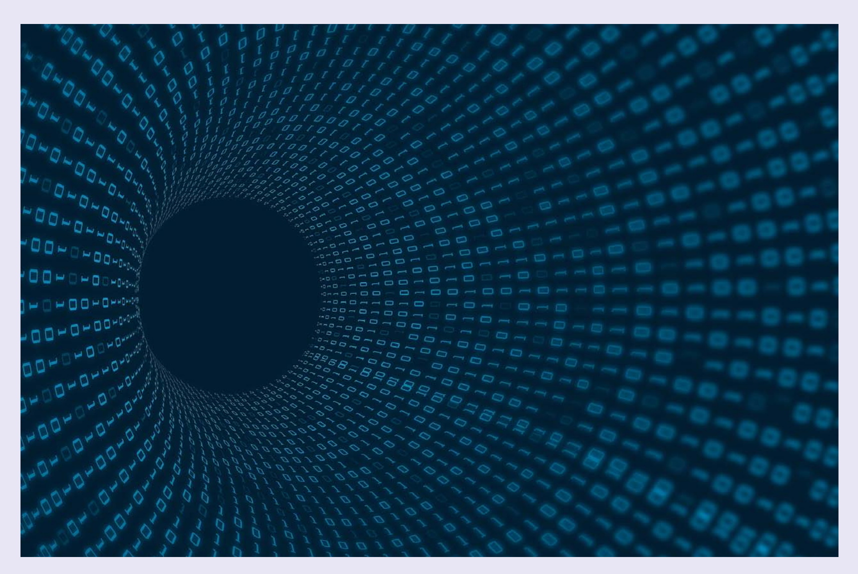
LA PARADOJA DE LA INFORMACIÓN

Información y agujeros negros

La existencia de los agujeros negros supuso una confirmación espectacular de la teoría de la relatividad general, pero estos astros plantean problemas relacionados con la conservación de la información [*véase* «Cómo fugarse de un agujero negro», por Steven B. Giddings; Investigación y Ciencia, febrero de 2020]. En principio, los objetos que caen en un agujero negro desaparecen por completo para el resto del universo, ya que no pueden volver a salir. La única manera de acceder a la información que contienen sería lanzarse dentro del agujero, pero tampoco tendríamos forma de reenviarla al exterior.

Así pues, parece que los agujeros negros son regiones del cosmos donde la información se pierde (no se conserva). Pero ¿realmente es así? Los físicos han debatido mucho sobre esta cuestión. Suponer que el destino de los agujeros negros es convertirse en agujeros blancos ofrece una solución sencilla al dilema, porque entonces todo lo que cae en el agujero negro acabaría emergiendo de nuevo al exterior.

Sin embargo, hay un argumento en contra de esta solución que merece la pena analizar en detalle. En los años 1970, Jacob Bekenstein y Stephen Hawking demostraron que los agujeros negros poseen una entropía proporcional al área de su horizonte. Dicha entropía permite definir la temperatura del agujero e implica que este emite radiación, como cualquier cuerpo caliente. Pero, de acuerdo con los resultados de Boltzmann, la entropía también constituye una medida de la información, así que el área de un agujero negro podría indicar la cantidad máxima de información que es capaz de almacenar.



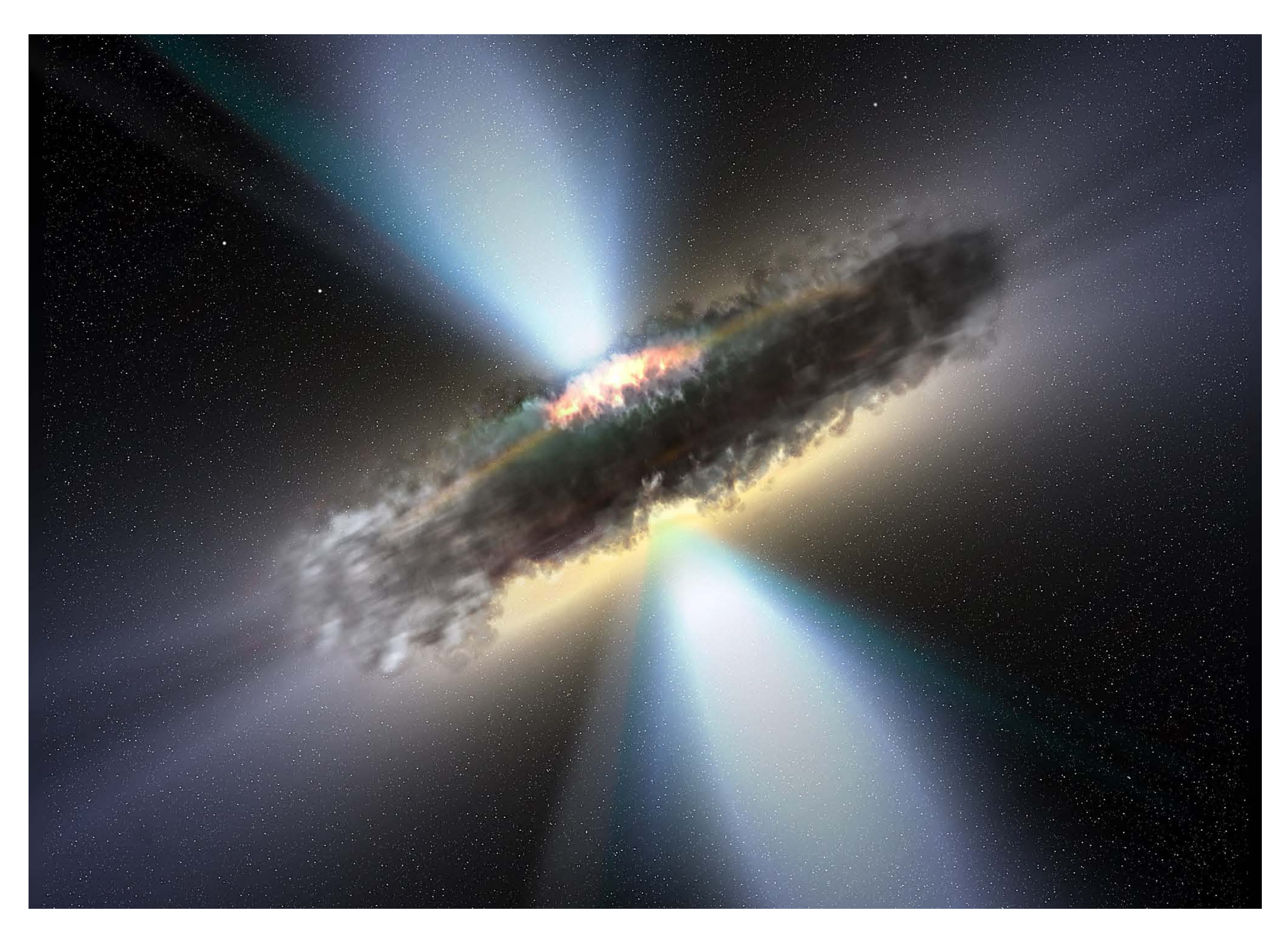
La información que cae a un agujero negro parece desaparecer para el resto del universo. La conversión de los agujeros negros en blancos ofrece una posible vía de escape.

Algunos físicos han convertido esta relación entre el área y la cantidad máxima de información en un principio absoluto: el principio holográfico. Pero el área del agujero negro disminuye a medida que se evapora y, tras perder más o menos la mitad de su masa, su horizonte es demasiado pequeño para conservar toda la información contenida en él. Esto implicaría necesariamente una pérdida de información.

Pero quizás haya un error en este razonamiento, que mezcla dos nociones distintas de entropía: la que mide la información que permanece accesible desde el exterior (y que determina el comportamiento termodinámico del agujero negro) antes de que se produzca la transición cuántica a agujero blanco y la que cuantifica toda la información que ha entrado en el agujero. La primera corresponde a la entropía de Bekenstein y Hawking, y disminuye con la evaporación, mientras que la segunda se mantiene grande.

Cuando se crea un agujero negro, la materia continúa colapsando en su interior y el espacio se estira formando un largo «tubo», cuyo volumen aumenta aunque la superficie del horizonte disminuya debido a la radiación de Hawking. El volumen interno del agujero negro puede conservar la información, que se restituirá íntegramente al universo cuando el agujero negro se convierta en blanco.

GETTY IMAGES/GAIHONG DONG/ISTOCK



LOS ASTRÓNOMOS han identificado numerosos agujeros negros en el universo, entre ellos agujeros supermasivos en el centro de las galaxias activas, como el que muestra esta recreación. No es probable que un astro tan pesado se transforme en agujero blanco, pero si un agujero negro más ligero lo hiciese, tal vez podríamos detectar la explosión asociada.

En concreto, para que suceda esto, debe de haber un instante en el cual el horizonte del agujero negro se convierta en el de un agujero blanco. La mecánica cuántica es la que permite esta transición gracias al efecto túnel. Este fenómeno consiste en una breve violación de las leyes de la física clásica (en este contexto, de la relatividad general). Conocido desde los años 20 del siglo pasado, el efecto túnel sirve para explicar, por ejemplo, la radiación alfa: en principio, la partícula alfa (dos protones y dos neutrones ligados) no puede escapar del núcleo atómico debido al potencial nuclear generado por las interacciones fuerte y electromagnética. Pero merced al efecto túnel, la partícula alfa puede pasar bajo la barrera de potencial y abandonar el núcleo.

En 2018, Marios Christodoulou, Fabio D'Ambrosio, Simone Speziale y yo, en Marsella, en colaboración con Ilya Vilensky, de la Universidad Atlántica de Florida, Eugenio Bianchi, de la Universidad Estatal de Pensilvania, y Haggard, demostramos que la transición de un agujero negro a un agujero blanco por efecto túnel es posible en la gravedad cuántica de bucles. Al mismo tiempo, Abhay Ashtekar, de la Universidad Estatal de Pensilvania, y Xavier Olmedo y Parampreet Singh, de la Universidad Estatal de Luisiana, probaron que dicha transición puede producirse muy cerca del centro del agujero negro. Combinando estos dos resultados con la solución de las ecuaciones de Einstein fuera de la región donde los efectos cuánticos sobre el espaciotiempo son importantes, obtenemos una descripción completa de lo que le puede pasar un agujero negro: la conclusión es que muere y se transforma en un agujero blanco.

UN AGUJERO BLANCO AL FINAL DEL TÚNEL

Los fenómenos que dependen del efecto túnel tardan bastante en producirse, porque la probabilidad de que ocurra es muy pequeña. Como resultado, algunos núcleos radiactivos que, en principio, son inestables tienen vidas medias de miles de años. Del mismo modo, los agujeros negros no se convierten inmediatamente en agujeros blancos, sino que presentan una vida media muy grande, sobre todo los más masivos. En efecto, dado que el efecto túnel es un fenómeno cuántico, tiene más probabilidades de acontecer a escalas pequeñas y, por lo tanto, en agujeros negros de menor tamaño.

Si los agujeros negros estuvieran gobernados únicamente por las leyes clásicas, serían eternos. Pero no hay nada eterno. Como ya hemos mencionado, Hawking demostró en 1974 que los agujeros negros emiten una radiación muy débil. Para un observador distante, el agujero negro pierde masa: se evapora.

Cuanto más pequeño se vuelve el agujero negro debido a esta evaporación, más aumenta la probabilidad de que se convierta en agujero blanco. En un momento dado se produce la transición, y es el propio espaciotiempo el que se transforma por efecto túnel y cambia su geometría. El agujero negro deja de comportarse según las ecuaciones de la relatividad general

clásica, se vuelve un agujero blanco y comienza de nuevo a obedecer dichas ecuaciones.

UNA PARADOJA MUY RELATIVA

Hemos descrito el nacimiento de un agujero blanco de dos maneras distintas, pero parece haber algo que no cuadra: por un lado, la transición por efecto túnel requiere bastante tiempo y, en efecto, en el cosmos vemos agujeros negros que tienen millones de años y otros que seguramente son aún mucho más antiguos; por otro lado, cuando una estrella colapsa para formar un agujero negro, la materia cae al centro en menos de un milisegundo y tarda más o menos lo mismo en alcanzar el estado de estrella de Planck, antes de rebotar. Así que en un caso la transformación es lenta, y en el otro, casi inmediata. ¿Cómo puede ser que el paso de agujero negro a agujero blanco sea tan lento y tan rápido a la vez?

En realidad, esto no tiene nada de raro en el marco de la relatividad general, donde el tiempo es muy «flexible». Los objetos masivos curvan el espaciotiempo, de manera que el tiempo se ralentiza (se dilata). Por ejemplo, en la Tierra, el tiempo discurre más despacio al nivel del mar que en lo alto de una montaña. En nuestro planeta el efecto es ínfimo, pero cerca de un agujero negro se torna mucho más importante: un intervalo de tiempo muy corto en el interior del agujero le parecerá muy largo a un observador externo. De modo que el rebote, que se produce en pocos milisegundos, se vería a cámara lenta desde fuera. Por lo tanto, es posible que los agujeros negros que observamos en el cosmos estén colapsando y rebotando, y nosotros percibamos una secuencia extremadamente ralentizada.

La posibilidad de que los agujeros negros se vuelvan blancos es atractiva en muchos sentidos. Ofrece una visión coherente de la evolución de los agujeros negros y aporta una solución al problema de la conservación de la información (*véase el recuadro* «Información y agujeros negros»). Y presenta un paralelismo interesante con la idea de que nuestro universo pudo comenzar con un «gran rebote», también planteada en la gravedad cuántica de bucles. Pero implica que el cielo debería estar lleno de agujeros blancos. Si es así, ¿hay algún modo de verlos?

La respuesta es «tal vez». Los agujeros negros que hemos identificado pueden dividirse en varias categorías. La primera está formada por los agujeros negros supermasivos (del orden de un millón de masas solares) que habitan en el centro de las galaxias espirales. La segunda está representada por los agujeros negros que han detectado los interferómetros LIGO y Virgo, objetos más masivos que las estrellas (pesan varias decenas de veces más que el Sol) y cuyo origen aún no está claro. Podrían tener millones de años y haber experimentado un crecimiento acelerado o ser mucho más antiguos: agujeros negros primordiales, nacidos en los turbulentos albores del universo. La tercera categoría la constituyen los remanentes que dejan las estrellas masivas tras colapsar al final de sus vidas. Pero estos tres tipos de agujeros negros son demasiado

ORIGEN DEL COSMOS

Un universo que rebota

Las galaxias se alejan unas de otras debido a la expansión del cosmos. Si retrocedemos en el tiempo, estas estructuras se aproximan entre sí, la materia se concentra y la densidad aumenta hasta hacerse infinita hace 13.700 millones de años, momento que se interpreta como el comienzo del universo. Sin embargo, ahí se rebasan los límites de la relatividad general. Para describir correctamente el universo en esa época hay que tener en cuenta los efectos cuánticos del espaciotiempo, y eso requiere una teoría cuántica de la gravedad.

La gravedad cuántica de bucles es una de las teorías que se han estudiado. Una de sus consecuencias es que el espaciotiempo es discreto y toma la forma de una malla discontinua, con cuantos de espaciotiempo análogos a los cuantos de energía que intercambian las partículas según la mecánica cuántica. El tamaño de estos cuantos es del orden de la longitud de Planck, es decir, de unos 10^{-35} metros.

La estructura discreta del espaciotiempo modifica el comportamiento de la gravedad. Los cuantos de espaciotiempo no pueden acumular una cantidad infinita de energía, de modo que cuando la densidad de energía se hace demasiado grande (como en el centro de un agujero negro o al principio del universo) la gravedad se vuelve repulsiva.

En este contexto no puede formarse ninguna singularidad, ni dentro de un agujero negro ni al comienzo del universo, así que el cosmos no puede haber aparecido de la nada. En 2007, Martin Bojowald, de la Universidad Estatal de Pensilvania, propuso que un universo anterior habría colapsado sobre sí mismo hasta alcanzar la densidad crítica para la cual la gravedad se hace repulsiva. Entonces habría rebotado, dando origen a nuestro universo. La gran explosión sería el instante en que se produce ese rebote.



Según la gravedad cuántica de bucles, el universo habría nacido a partir de la contracción y el rebote de un universo anterior.

Esta idea del «gran rebote» aparece en otros tratamientos cuánticos de la gravedad, como la teoría de cuerdas. Sin embargo, es muy difícil ponerla a prueba, porque el rebote habría borrado todas las huellas del universo anterior. Pero Carlo Rovelli y sus colaboradores sostienen que algunos agujeros blancos nacidos en ese universo previo podrían haber sobrevivido al rebote. Es una idea muy especulativa, pero que abre una vía interesante para comprender el universo.

grandes como para tener opciones de transformarse en agujeros blancos por efecto túnel hoy en día.

Los agujeros negros verdaderamente pequeños son los únicos que tendrían una probabilidad no despreciable de sufrir esta transición cuántica. Pero quizá el universo esté lleno de tales astros, que podrían haber nacido poco después de la gran explosión, cuando el cosmos era muy denso y caliente, y se expandía muy deprisa. Las fluctuaciones de densidad habrían generado acumulaciones localizadas de materia, que habrían dado lugar a agujeros negros de masas muy diversas. No sabemos cuántos de estos agujeros negros podrían haberse formado, y por eso resulta difícil hacer predicciones sobre las poblaciones de agujeros blancos.

AGUJEROS BLANCOS Y MATERIA OSCURA

Y aún hay otro obstáculo: en la gravedad cuántica de bucles, la vida media de un agujero negro depende de la radiación de Hawking y de la probabilidad de que se transforme en agujero blanco por efecto túnel, la cual no se ha determinado de manera precisa. Los cálculos son complejos y requieren aproximaciones. En la actualidad, podemos deducir una cota superior para la vida media cuando solo tenemos en cuenta la evaporación de Hawking (el agujero negro pierde toda su masa a través de este mecanismo) y una cota inferior si consideramos únicamente la probabilidad de conversión por efecto túnel. Y eso nos permite extraer algunas conclusiones.

Si la vida media fuese larga, solo los agujeros negros primordiales más pequeños, con masas comprendidas entre 10^7 y 10^{12} kilogramos (aproximadamente, entre la masa del *Titanic* y diez veces la de la presa china de las Tres Gargantas), se habrían vuelto blancos y serían observables en la actualidad. En tal caso, la mayoría de los agujeros blancos del cielo tendrían un tamaño mínimo (del orden de la longitud de Planck, unos 10^{-35} metros).

Un aspecto interesante es que estos agujeros blancos serían bastante estables: los efectos cuánticos les impedirían perder toda su masa, por lo que su vida media sería mayor que la edad del universo. Así pues, podrían contribuir a la materia oscura, una componente del universo cinco o seis veces más abundante que la materia ordinaria (aquella compuesta por átomos). Existen numerosas pruebas indirectas de la presencia de esta materia oscura, pero su naturaleza sigue siendo un misterio y la mayoría de las hipótesis consideradas requieren modificar leyes de la física bien establecidas. Algunas de estas propuestas se basan en teorías que predicen la existencia de nuevas entidades, como las partículas supersimétricas; sin embargo, los experimentos realizados para detectar estas partículas no han tenido éxito, lo que pone en duda la validez de estas teorías.

La posibilidad de que la materia oscura esté formada por pequeños agujeros blancos (y negros) no está demasiado restringida por las observaciones. En las proximidades del sistema solar, la densidad de materia oscura sería de unas 0,01 masas solares por parsec cúbico. (Proxima Centauri, la estrella más cercana al Sol, se encuentra a 1,3 parsecs.) Para alcanzar esa cifra, bastaría con que hubiera un agujero blanco por cada 10.000 kilómetros cúbicos.

ESTALLIDOS DE RADIACIÓN

En cambio, si la vida media de los agujeros negros fuese corta, los agujeros primordiales que estarían transformándose hoy en día por efecto túnel tendrían una masa comparable a la de un pequeño planeta y explotarían violentamente, convirtiendo una gran parte de su masa en radiación. Esos sucesos emitirían ráfagas muy breves de microondas u ondas de radio, que también podrían incluir una componente más energética. Pero hay muchos fenómenos astrofísicos transitorios que aún no entendemos bien, como los estallidos de rayos gamma [*véase* «Las explosiones más brillantes del universo», por Neil Gehrels, Luigi Piro y Peter J. T. Leonard; Investigación y Ciencia, febrero de 2003] o las explosiones rápidas de radio [*véase* «El misterio de las explosiones rápidas de radio», por Duncan Lorimer y Maura McLaughlin; Investigación y Ciencia, junio de 2018]. Aunque se han propuesto diversas explicaciones para estos eventos, no es imposible que una parte de ellos provenga de la conversión de agujeros negros en agujeros blancos.

Hay una característica que nos permitiría reconocer las señales procedentes de los agujeros blancos: un desplazamiento al rojo «aplanado». La longitud de onda de la luz emitida por un astro lejano aumenta debido a dos fenómenos: la expansión del universo (cuyo efecto es mayor cuanto más lejano y antiguo sea el astro) y el corrimiento al rojo gravitacional (que crece con su masa). Pero los primeros agujeros negros en convertirse en blancos también serían los más ligeros, de modo que su menor corrimiento al rojo gravitacional compensaría el mayor efecto de la expansión. En definitiva, observaríamos un desplazamiento al rojo aplanado (que aumenta menos de lo esperado para objetos más y más antiguos), que podría ponerse de manifiesto a partir de análisis estadísticos con grandes cantidades de datos de rayos gamma o de explosiones rápidas de radio.

Descubrir una prueba de la existencia de los agujeros blancos (por ejemplo, en los estallidos de radiación o la materia oscura) supondría un avance espectacular en nuestra percepción del universo. Observar el nacimiento de agujeros blancos sería una forma de ver la gravedad cuántica en acción y abriría una ventana a uno de los problemas más importantes de la física teórica: la comprensión de la naturaleza cuántica del espaciotiempo.

Estas nuevas ideas sobre los agujeros blancos arrojan luz sobre muchos aspectos de la física teórica y la cosmología. La hipótesis de la transformación de agujeros negros en agujeros blancos aún no se ha explorado demasiado y muchas preguntas continúan sin respuesta. Y así seguirán mientras no consigamos identificar un agujero blanco. Esperemos que nos lleve menos tiempo del que necesitamos para comprobar la existencia de los agujeros negros. IyC

PARA SABER MÁS

Planck stars. Carlo Rovelli y Francesca Vidotto en *International Journal of Modern Physics D*, vol. 23, art. 1442026, octubre de 2014.

Quantum-gravity effects outside the horizon spark black to white hole tunneling. Hal M. Haggard y Carlo Rovelli en *Physical Review D*, vol. 92, art. 104020, noviembre de 2015.

White holes as remnants: a surprising scenario for the end of a black hole. Eugenio Bianchi et al. en *Classical and Quantum Gravity*, vol. 35, art. 225003, octubre de 2018.

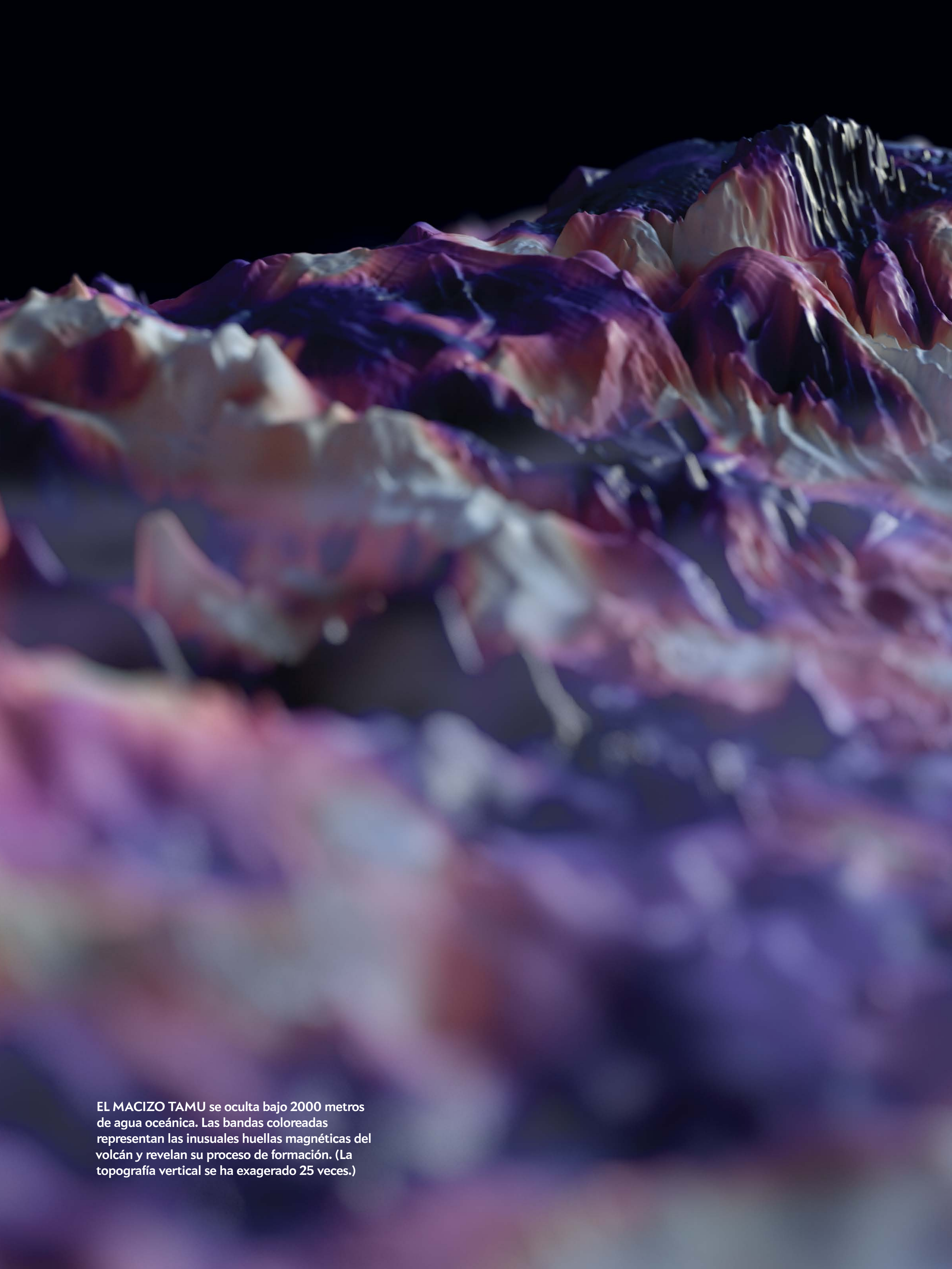
Small black/white hole stability and dark matter. Carlo Rovelli y Francesca Vidotto en *Universe*, vol. 4, art. 127, noviembre de 2018.

Quantum transfiguration of Kruskal black holes. Abhay Ashtekar, Javier Olmedo y Parampreet Singh en *Physical Review Letters*, vol. 121, art. 241301, diciembre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Rebote del universo. Martin Bojowald en *IyC*, diciembre de 2008.

¿Qué es el espaciotiempo? George Musser en *IyC*, agosto de 2018.



EL MACIZO TAMU se oculta bajo 2000 metros de agua oceánica. Las bandas coloreadas representan las inusuales huellas magnéticas del volcán y revelan su proceso de formación. (La topografía vertical se ha exagerado 25 veces.)

William W. Sager es profesor de geofísica en la Universidad de Houston. Se ha embarcado en 46 expediciones oceanográficas y dio nombre al macizo Tamu.



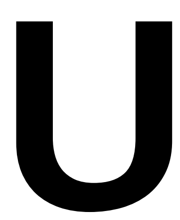
GEOLOGÍA

REINTERPRETAR UN VOLCÁN

Una nueva concepción del descomunal macizo Tamu obliga a revisar nuestras ideas sobre la formación del fondo oceánico

William W. Sager

Ilustración de Craig Taylor, Mapzilla



NAS OLAS ENORMES Y OSCURAS SACUDÍAN NUESTRO BARCO DE INVESTIGACIÓN. El *Falkor* mide 83 metros de eslora y pesa más de 2000 toneladas, pero la tormenta procedente de Siberia que acabábamos de evitar aún agitaba las aguas. Sentado en el laboratorio científico de la cubierta principal, procuraba que el café no se derramara sobre mi mapa del fondo oceánico.

Era mediados de octubre de 2015 y nos hallábamos en el noroeste del océano Pacífico, unos 1600 kilómetros al este de Japón. Yo examinaba por enésima vez el mapa, que mostraba unas bandas más o menos paralelas en el fondo marino alrededor del macizo Tamu, un enorme y antiguo volcán. Esas bandas reflejaban la magnetización (positiva o negativa) de distintas franjas del fondo oceánico, pero su distribución no encajaba con la dinámica eruptiva que yo había imaginado.

De repente, una ola golpeó el *Falkor* con estruendo, y en ese preciso instante me di cuenta de lo que había pasado por alto. Llevaba más de dos décadas estudiando ese volcán y había publicado los artículos que le daban nombre y explicaban su historia. Así que mi revelación solo fue en parte un momento «¡eureka!»: la otra parte fue un momento «¡ouch!» de Homer Simpson. Mis viejas ideas (y las del resto de expertos) sobre la formación del volcán estaban equivocadas.

El macizo Tamu es especial. Con unos 600 kilómetros de largo y 430 de ancho, ocupa una superficie similar a la de media península ibérica. Pese a ser casi plano, su volumen es más de 50 veces superior al del volcán Mauna Loa, en Hawái. Sus amplias laderas descienden desde el centro con una inclinación de aproximadamente un grado, en comparación con los cinco o diez grados habituales en otros volcanes submarinos. Para hacernos una idea, podemos pensar en un campo de fútbol cubierto con una lona gris tensa, que se apoya sobre un palo de tan solo 60 centímetros clavado en el centro del campo.

El volcán es la principal montaña de la meseta oceánica Shatsky (una de las más grandes del planeta) y su cima se encuentra a unos 1980 metros bajo la superficie del mar. La mayoría de mesetas oceánicas están hechas de basalto, lo que quiere decir que grandes volúmenes de magma ascendieron desde el manto terrestre y atravesaron la corteza hasta brotar en el fondo marino. Si bien la morfología del macizo Tamu parece responder a este proceso eruptivo, los datos que he recogido desde 2015 demuestran que allí ocurrió algo distinto.

Y eso implica que los científicos no habíamos entendido bien el modo en que decenas de inmensos volcanes submarinos han creado más del 5 por ciento del fondo oceánico actual. De hecho, nos hemos topado con un tipo de volcán completamente nuevo.

Si el macizo Tamu o alguno de sus parientes volvieran a hacer erupción, eso podría acidificar el océano Pacífico y destruir cualquier forma de vida marina. También podría liberar grandes cantidades de gases de efecto invernadero al océano y a la atmósfera. Si echamos la vista atrás en el tiempo, parece que las erupciones de la meseta Ontong Java, un volcán similar en el suroeste del océano Pacífico, coincidieron con niveles bajos de oxígeno en las aguas oceánicas. Por último, por inspirador que resulte reescribir nuestras ideas sobre la formación del fondo marino, también debo aceptar la cruda realidad: el macizo Tamu, que había sido calificado como «el mayor volcán de escudo de la Tierra», ya no merece esa distinción.

PASTELES Y BIZCOCHOS

El macizo Tamu se formó de manera gradual, a lo largo de varios millones de años, hace unos 145 millones de años. Durante ese período, el campo magnético terrestre se invirtió un par de veces a intervalos irregulares y generó unas reveladoras bandas magnéticas en la corteza oceánica.

Mi primer artículo sobre la historia magnética del macizo Tamu se publicó en 1993, cuando trabajaba en la Universidad A&M de Texas (cuyas siglas en inglés son el origen del nombre «Tamu»). En él concluía que el volcán se formó en poco tiempo, a partir de un solo evento eruptivo: una gran bolsa de magma de cientos de kilómetros de diámetro ascendió a través del manto y se esparció sobre el fondo oceánico. Debido a las tremendas erupciones, riadas de basalto caliente bajaron por las laderas en crecimiento y formaron una capa extensa y ligeramente abovedada de nuevo material. Las siguientes erupciones fueron añadiendo niveles, hasta crear una especie de pastel con varias capas basálticas: la más antigua en la base y la más reciente en la parte superior (*véase el recuadro* «Una nueva imagen del Tamu», *en las páginas 74-75*). En general, así es como se forman los volcanes de escudo en tierra firme, y otros expertos tenían ideas similares sobre las mesetas oceánicas más grandes del mundo: Kerguelen, en el sur del océano Índico, y Ontong Java.

En 2013, tras nuevas expediciones para seguir cartografiando el macizo Tamu y tomar muestras de sus basaltos, mis colaboradores y yo publicamos un artículo en *Nature Geoscience* donde lo describíamos como un enorme volcán de escudo. Los medios no tardaron en proclamar que habíamos descubierto «el volcán de escudo más grande del mundo».

Ese superlativo siempre me incomodó. Traté de aclarar a los periodistas que el hallazgo del macizo Tamu se remontaba a principios del siglo XX y que existían mesetas oceánicas de mayor tamaño. Pero me preocupaba algo más: la distribución de las bandas magnéticas era extraña para tratarse de un extenso volcán de escudo formado como un pastel con varias capas.

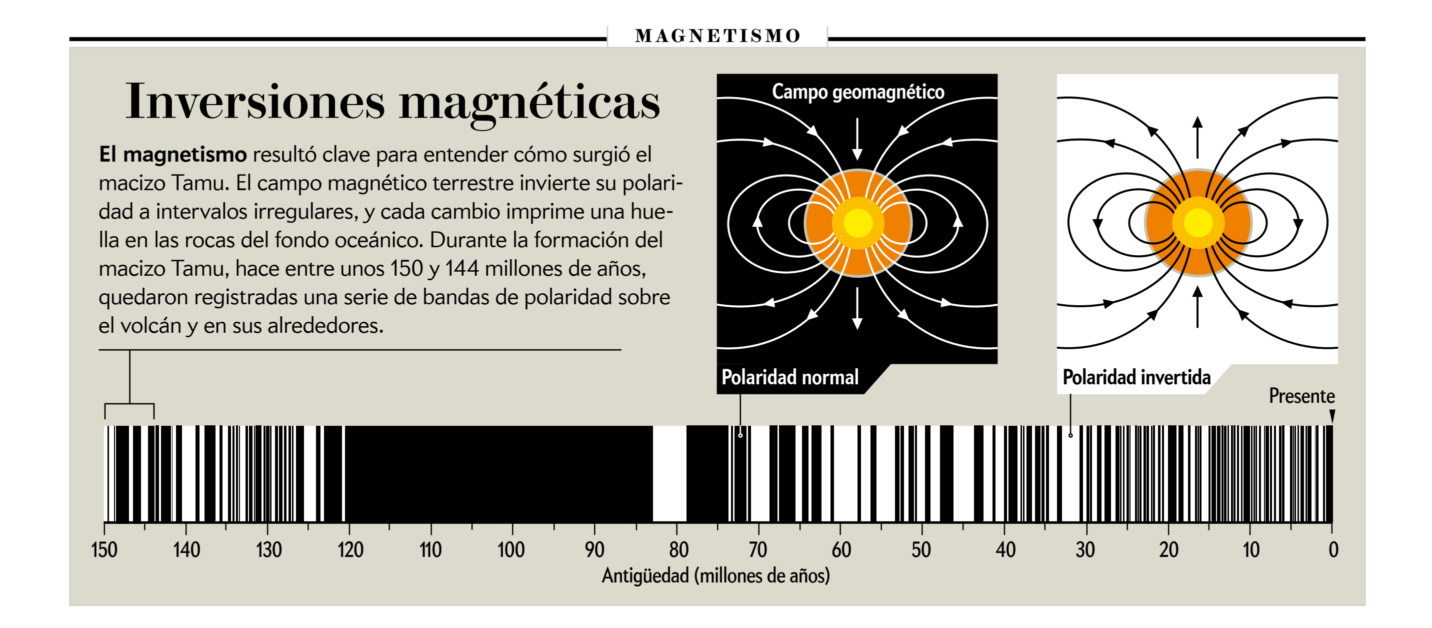
Si observáramos el fondo del océano Pacífico desde el espacio con unas gafas que revelasen el magnetismo, apreciaríamos bandas paralelas por todas partes. Sin embargo, allí donde hubiera un volcán esperaríamos ver una gran mancha, puesto que la lava emanada en el centro interrumpiría el patrón. Como no tengo

EN SÍNTESIS

Nuevos datos magnéticos del fondo del océano Pacífico indican que el macizo Tamu, un descomunal volcán submarino, no surgió como pensaban los expertos.

En vez de hacer erupción como una montaña volcánica, el macizo Tamu se formó a partir de la lava que brotaba entre placas tectónicas divergentes.

El mismo proceso parece haberse dado en muchas otras mesetas oceánicas y constituye una nueva explicación para el origen de estas enormes estructuras.



FUENTE: «GEOMAGNETIC POLARITY TIMESCALES AND REVERSAL FREQUENCY REGIMES», POR W. LOWRIE Y D. V. KENT EN *TIMESCALES OF THE PALEOMAGNETIC FIELD*, EDITADO POR J. E. T. CHANNELL ET AL. AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, 2004 (*línea de tiempo*); JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*)

esas gafas, he recopilado datos sobre el campo magnético en el mar. Mi momento «¡eureka!» en el *Falkor* llegó cuando entendí que una banda ancha y continua atravesaba el macizo Tamu.

El macizo Tamu se formó en una unión triple, un lugar donde se juntan tres placas tectónicas. Cuando dos de ellas se separaron, se abrió una grieta a lo largo del borde. El magma brotó para rellenar el hueco y se solidificó en forma de basalto. A medida que las placas siguieron alejándose, esa nueva franja de terreno también se fracturó longitudinalmente y otro brote de magma llenó el vacío resultante.

Este proceso se repitió una y otra vez. El macizo Tamu no se formó como un pastel en capas. En cambio, imaginemos que un bizcocho se separa en dos horizontalmente y que la fisura creada en el centro se rellena con otro bizcocho. Cuando este también se divide, introducimos un tercer bizcocho en la grieta recién abierta, y así sucesivamente. Si los nuevos trozos van cambiando de sabor, uno de chocolate y el siguiente de vainilla, con el tiempo surgirá un patrón de franjas como el que dibujan las bandas magnéticas positivas y negativas del macizo Tamu.

No obstante, esta explicación presenta dos problemas. Por un lado, las bandas del cuadrante sureste del Tamu están rotadas 90 grados en sentido antihorario. En retrospectiva, la razón es casi evidente: a lo largo de las sucesivas erupciones del macizo, una parte de la placa situada al noreste se rompió y se desplazó, haciendo que un segmento próximo a la unión triple girase 90 grados. Y allí se formó el macizo Tamu. Comprender que la banda sobre el centro del volcán era una anomalía magnética asociada a la expansión del fondo marino fue mi momento «¡ouch!».

El segundo problema radica en que, según el modelo del bizcocho, todos los trozos deberían tener la misma altura. Sin embargo, el macizo Tamu es más grueso en la zona central. En mi opinión, ese perfil puede deberse a un aumento transitorio de la fusión en el centro, que habría generado una corteza más alta.

TAMU, TOMA DOS

Mis colaboradores y yo hemos reunido numerosos datos del fondo oceánico y hemos extraído testigos de basalto de la zona, los cuales nos ayudan a convencer a otros científicos de que nuestra interpretación es válida. Este nuevo modo de entender el macizo Tamu revoluciona las ideas sobre la formación de las mesetas oceánicas. Los estudios realizados en otras mesetas (aquellas donde existen suficientes datos magnéticos para cartografiar las bandas) revelan que muchas se formaron de manera similar: las mesetas generadas en zonas donde las placas tectónicas se estaban separando deben constituir una nueva clase de volcán. Eso implica que la hipótesis ampliamente aceptada de que las mesetas oceánicas son grandes volcanes de escudo, creados por copiosos flujos de lava basáltica, es incorrecta.

¿Por qué nos habíamos equivocado? Y ¿es relevante que el macizo Tamu no sea un volcán de escudo? Erramos porque los volcanes submarinos se esconden bajo miles de metros de agua, y eso nos obliga a componer una imagen a partir de datos incompletos. Supongamos que debemos reconstruir un dinosaurio únicamente a partir de un diente y un hueso de un dedo del pie. Trataríamos de conectarlos a partir de lo que sabemos sobre otros dinosaurios. Pero si los supuestos de partida son erróneos, la imagen resultante también lo será. El macizo Tamu ya no es el mayor volcán de escudo de la Tierra porque no es un volcán de escudo. Asumimos que se había formado como otros volcanes, pero esta idea no era correcta. En cambio, hemos descubierto una nueva familia de montañas volcánicas, y una nueva manera de explicar cómo se formaron algunas enormes estructuras de nuestro planeta. Y hay decenas de ellas bajo el mar.

Los científicos tratamos de entender cómo surgió aquello que observamos, incluso si eso invalida nuestros propios hallazgos previos. La reinterpretación del macizo Tamu me permite afirmar: «Al final lo entendimos». No es un titular tan impactante como «el más grande del mundo», pero a mí me gusta más. IyC

PARA SABER MÁS

An immense shield volcano within the Shatsky Rise oceanic plateau, northwest Pacific Ocean. William W. Sager et al. en *Nature Geoscience*, vol. 6, págs. 976-981, noviembre de 2013.

Oceanic plateau formation by seafloor spreading implied by Tamu Massif magnetic anomalies. William W. Sager et al. en *Nature Geoscience*, vol. 12, págs. 661-666, agosto de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Supervolcanes. Ilya N. Bindeman en *IyC*, agosto de 2006.

Origen del fondo submarino. Peter B. Kelemen en *IyC*, mayo de 2009.

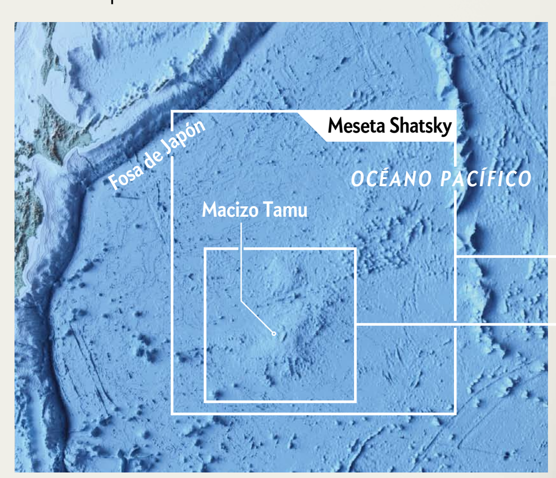
Una nueva imagen del Tamu

Durante años, los científicos pensaron que el macizo Tamu, en el fondo del océano Pacífico, era un típico volcán de escudo. Pero la distribución de las bandas magnéticas que lo surcan no se ajusta a esa idea. Los últimos datos sobre los movimientos de las placas tectónicas en el momento en que se formó el macizo, hace millones de años, revelan que el magma dio lugar a un nuevo tipo de volcán, semejante a un bizcocho partido en dos.

Fosa de Japón

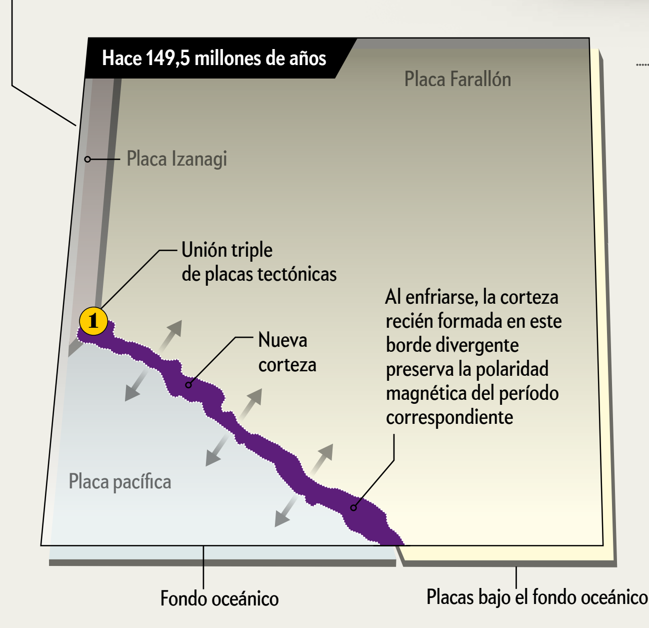
Anomalías magnéticas sobre el fondo oceánico

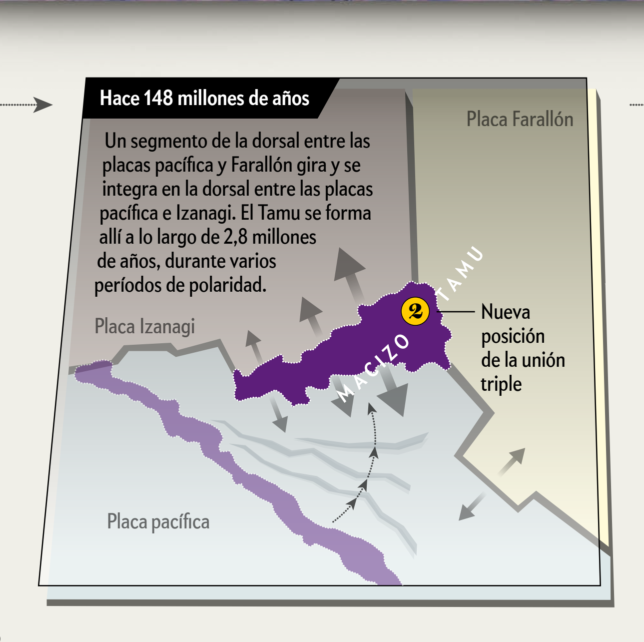
MACIZO TAMU



EL ORIGEN DE LAS BANDAS

Hace unos 149 millones de años, tres placas tectónicas bajo el océano Pacífico se separaban a partir de una unión triple (1), cerca de donde más tarde emergería el macizo Tamu. La creciente grieta se rellenó de nueva corteza. Hace unos 148 millones de años, mientras se formaba el Tamu, la unión triple se desplazó al noreste; un segmento de la dorsal entre las placas pacífica y Farallón rotó en sentido antihorario y pasó a formar parte de la dorsal entre las placas pacífica e Izanagi (2), lo que hizo girar las bandas del macizo Tamu. Hace 144 millones de años, tras cesar las erupciones del volcán, la unión triple se había vuelto a mover debido al desplazamiento de la placa Izanagi (3). La ancha banda que recorre el centro del volcán indica que la mayoría de las erupciones ocurrieron durante un mismo período de polaridad invertida.





Anomalía magnética
(en función de la polaridad de la Tierra)

Negativa — Positiva

EL FONDO OCEÁNICO ACTUAL

Un mapa de las huellas magnéticas del fondo oceánico alrededor del macizo Tamu (*inserto*) muestra bandas paralelas de orientación noroeste-sureste que se extienden al este y al oeste de la mitad inferior del volcán 1. Sin embargo, las líneas que se observan sobre el propio volcán 2 están giradas unos 90 grados en sentido antihorario y son unas dos veces más anchas que el resto, porque el volcán se formó en un punto donde las placas tectónicas rotaban y se separaban rápidamente.

Hace 144,5 millones de años

La unión triple sigue migrando al norte

3

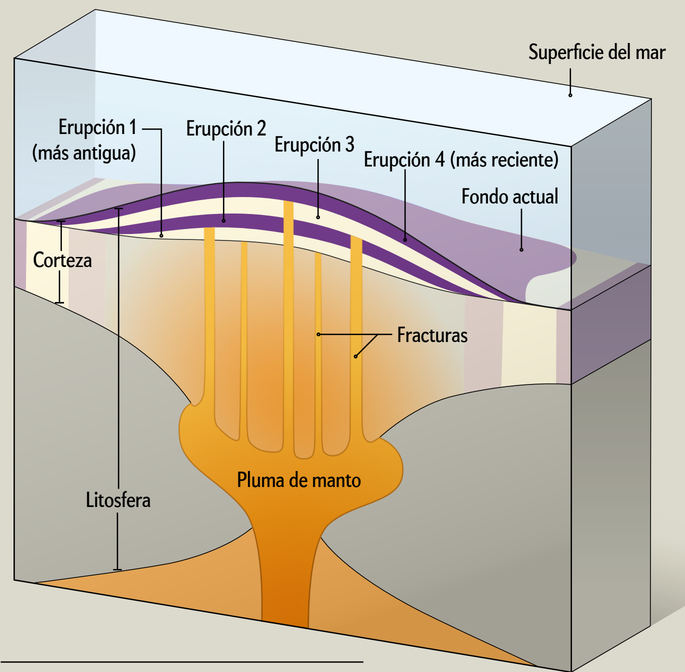
Placa Izanagi

MACIZO TAMU

Placa pacífica

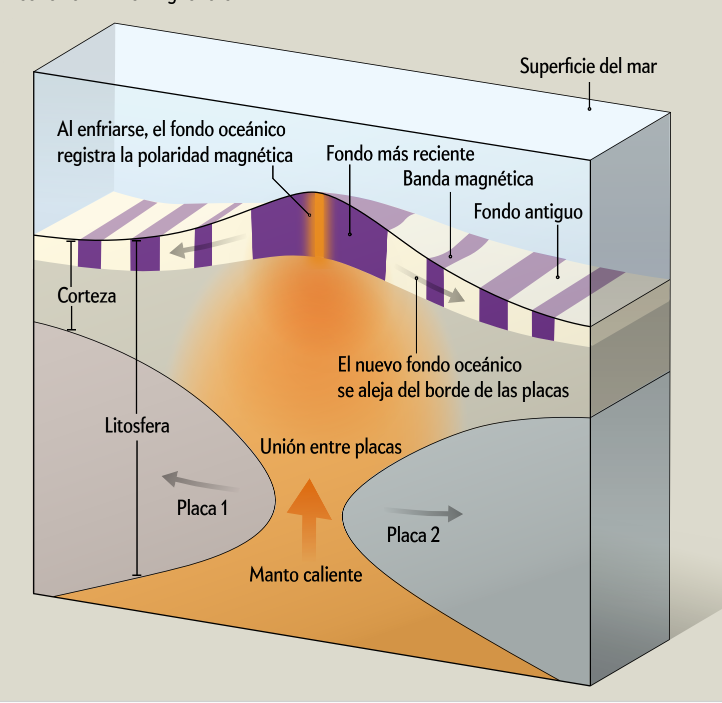
ANTIGUA EXPLICACIÓN: PASTEL EN CAPAS

Un volcán de escudo (la descripción original del macizo Tamu) se forma como un pastel con varias capas. El manto cálido asciende y se funde bajo la litosfera, más fría. Una fractura vertical permite que el magma caliente de la pluma ascienda a través de la corteza oceánica y haga erupción, fluyendo por el fondo marino y enfriándose en forma de domo aplanado. Las sucesivas erupciones añaden nuevas capas al domo.



NUEVA EXPLICACIÓN: BIZCOCHO

A medida que divergen las placas tectónicas, la litosfera y la corteza se fracturan a lo largo del borde, como si cortáramos un bizcocho por el centro y lo separáramos horizontalmente. El magma caliente asciende para llenar el hueco y se solidifica en forma de fondo oceánico. Las placas siguen alejándose y estiran el fondo recién creado, hasta abrir otra grieta que se rellena de nuevo magma. Este proceso se repite; al enfriarse, las rocas registran la polaridad magnética existente, y con el tiempo se generan una serie de bandas magnéticas.



CRAIG TAYLOR, MAPZILLA (*mapas*); JEN CHRISTIANSEN (*ilustraciones*)

Retrofuturismo

Igual que la ficción *steampunk* combina el estilo victoriano con tecnología futurista, una nueva rama de la física actualiza la termodinámica del siglo XIX para aplicarla a los sistemas cuánticos modernos

Nicole Yunger Halpern

Ilustración de Viktor Koen


cuántico
19
18
17
14
13
21
26
11
15
10
16



Nicole Yunger Halpern es física teórica e investigadora posdoctoral en la Universidad Harvard. Escribe artículos mensuales en *Quantum frontiers*, el blog del Centro de Información y Materia Cuántica del Instituto de Tecnología de California.



ONDRES, A UNA HORA QUE HACÍA QUE ROSALIND SE ALEGRASE DE HABERLE BIRLADO la capa negra a su hermano, en lugar de vestir la suya escarlata. La fábrica junto a la que se encontraba había dejado de arrojar humo durante la noche, pero pronto comenzaría a hacerlo de nuevo. Un ruido la hizo retroceder contra la pared de ladrillo. Levantó la vista y lanzó un grito ahogado. Un casco alargado surcaba el cielo. La oscuridad le impedía ver los detalles, pero no los necesitaba: seguro que tenía un candado de color bronce pintado en el lateral. Mellator había lanzado su dirigible.

Bienvenidos al *steampunk*, una corriente que se ha popularizado en la literatura, el arte y el cine en las últimas décadas. Sus historias suelen estar ambientadas junto a incipientes fábricas y en ciudades mugrientas, en la Inglaterra de la era industrial o en el salvaje Oeste: escenarios reales donde la tecnología estaba floreciendo. Pero estas obras van un paso más allá e incorporan invenciones futuristas, como autómatas y máquinas del tiempo, en una yuxtaposición de lo viejo y lo nuevo que crea una atmósfera de romanticismo y aventura. No es de extrañar que los entusiastas del *steampunk* compren sombreros de copa y corsés, se engalanen con bronce y cristal, y acudan en masa a las convenciones del género.

Esos aficionados sueñan con aventuras. Pero los físicos que trabajan en la intersección de la física cuántica, la teoría de la información y la termodinámica las viven. Del mismo modo que el *steampunk* combina tecnologías de ciencia ficción y estilo victoriano, el campo de la física moderna al que me gusta referirme como «*steampunk* cuántico» une la tecnología del siglo XXI con principios científicos del siglo XIX.

Nuestro objetivo es actualizar las leyes de la termodinámica (la disciplina que estudia el trabajo, el calor y la eficiencia) para satisfacer las exigencias de los experimentos, las teorías y las tecnologías de vanguardia. La termodinámica nació cuando las máquinas de vapor impulsaban la Revolución Industrial. Pero, a medida que los dispositivos se miniaturizan, la termodinámica y la información se juntan en sistemas cada vez más pequeños. El foco de atención se ha desplazado de los trenes a los nanomotores, los motores moleculares de las células vivas y los refrigeradores diminutos. Ahora tenemos que investigar cómo aplicar conceptos termodinámicos tradicionales como el calor, el trabajo y el equilibrio a los sistemas cuánticos modernos.

FÍSICA VICTORIANA Y CIENCIA MILENIAL

En el año 1800, la máquina de vapor ya había sido inventada por Thomas Savery y Thomas Newcomen, y perfeccionada por James Watt y Matthew Boulton. Los intelectuales se preguntaban por la eficiencia con que esas máquinas podrían extraer agua de las minas y, de estos problemas prácticos, pasaron a cuestiones de la física fundamental, como por qué el tiempo fluye solo en un sentido [*véase* «El origen cósmico de la flecha del tiempo», por Sean M. Carrol; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2008]. La termodinámica se desarrolló a partir de estas indagaciones.

Esta rama de la física describe sistemas de muchas partículas (por ejemplo, el vapor) en términos de propiedades macroscópicas como la temperatura, la presión, el volumen y la energía. Esta última puede transferirse en forma de trabajo o de calor. Mientras que el trabajo es energía bien organizada, que puede usarse con un propósito (girar la rueda de un molino, pongamos por caso), el calor es la energía del movimiento aleatorio, de las partículas que van de un lado a otro.

La termodinámica cuantifica el desorden por medio de una magnitud llamada entropía. En una cámara de vapor, cada partícula tiene una posición y un momento (el producto de su masa por su velocidad). El conjunto de las posiciones y momentos de todas las partículas es lo que llamamos el microestado del vapor. Como no es posible determinarlo (en la cámara hay unas 10^{24} partículas, un 1 seguido de 24 ceros), lo que hacemos es evaluar la probabilidad de que el vapor se encuentre en uno u otro microestado, y la entropía mide nuestra incertidumbre. Según la segunda ley de la termodinámica, la entropía de un sistema cerrado y aislado no puede disminuir, y ese hecho está detrás de que el tiempo fluya en un solo sentido.

Pero las máquinas de vapor en las que se basa la termodinámica tradicional se parecen a la tecnología actual como

EN SÍNTESIS

La termodinámica, la rama de la física que se ocupa del calor y la eficiencia, surgió durante la Revolución Industrial. Los científicos tratan de actualizar sus leyes para aplicarlas a la computación, comunicación e información cuánticas.

Esta unión entre la ciencia del siglo XIX y la tecnología moderna recuerda a la mezcla de estilo victoriano e invenciones futuristas que caracteriza a la ficción *steampunk*, por lo que podemos referirnos a este campo como «*steampunk* cuántico».

Un éxito reciente del *steampunk* cuántico ha sido el diseño de un motor basado en principios cuánticos y termodinámicos. Por el momento se ha propuesto como un experimento mental, pero podría hacerse realidad en un futuro no muy lejano.

un sombrero de copa a un casco de realidad virtual. Muchos inventos y experimentos modernos incluyen sistemas cuánticos diminutos y complejos. La teoría cuántica es la física de los átomos, los electrones y otros constituyentes de la materia, los cuales pueden mostrar comportamientos inaccesibles para sistemas clásicos de mayor tamaño, como las cámaras de vapor, las fábricas o las personas.

Por ejemplo, las partículas cuánticas pueden experimentar una forma muy fuerte de correlación llamada entrelazamiento. Si tenemos dos átomos entrelazados y realizamos una medida sobre uno de ellos, el otro experimentará un cambio instantáneo, aunque se halle a una gran distancia, y los físicos pueden usar este fenómeno para procesar la información de un modo que resultaría imposible en un sistema clásico [*véase* «Procesamiento cuántico de la información», por Antonio Acín. Investigación y Ciencia, septiembre de 2006]. La teoría cuántica de la información, que estudia cómo resolver problemas computacionales, comunicarnos, proteger la información y mejorar las mediciones usando sistemas cuánticos, constituye una herramienta matemática útil para implementar nuestra actualización de la termodinámica. ¿Cuál es la relación entre ambos campos? Para pensar en la información, tenemos que enfrentarnos a la ignorancia; y los teóricos de la información cuantifican la ignorancia por medio de la entropía, igual que ocurre en la termodinámica.

En los ordenadores cuánticos son esenciales tanto la teoría cuántica de la información como la termodinámica. Google, IBM y otras compañías se afanan por construir este tipo de máquinas, que podrían descifrar ciertos esquemas de encriptación y modelizar algunos materiales mucho más deprisa que cualquier ordenador clásico. La mayoría de los sistemas de computación cuántica requieren temperaturas cercanas al cero absoluto, y enfriar no es sino disipar calor, una cantidad termodinámica. Aun así, los ordenadores cuánticos no se parecen en nada a las máquinas para las que se desarrolló la termodinámica.

Los intentos de trasladar los conceptos termodinámicos a contextos cuánticos datan de mediados del siglo xx, cuando Joseph Geusic, E. O. Schulz-DuBois y H. E. Derrick Scovil propusieron el primer motor cuántico, basado en un máser (un sistema que funciona como un láser, pero emitiendo radiación de microondas). Más adelante, Ronnie Kosloff, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, y sus colaboradores contribuyeron a convertir los motores cuánticos en una subárea de estudio. Otro pionero es Marlan Scully, conocido como el «vaquero cuántico», que trabaja en óptica cuántica en las universidades de Princeton y A&M de Texas, al tiempo que cría ganado. Los teóricos Gian Paolo Beretta, Elias Gyftopoulos y George Hatsopoulos (los dos últimos ya fallecidos) estudiaron la flecha del tiempo desde una perspectiva cuántica. Y Seth Lloyd estableció muchas ideas importantes para el campo de la termodinámica cuántica en su tesis doctoral, presentada en 1988 y titulada *Agujeros negros, demonios y la pérdida de la coherencia: Cómo obtienen información los sistemas complejos y qué hacen con ella*.

HERRAMIENTAS DEL *STEAMPUNK* CUÁNTICO

Como hemos visto, la entropía juega un papel destacado en la termodinámica, la teoría de la información y la teoría cuántica. A menudo se piensa en la entropía como una entidad única, pero en realidad existen muchas clases de entropía, definidas por distintas funciones matemáticas que describen situaciones diversas. Las más conocidas son las introducidas en la termodinámica por Ludwig Boltzmann y Josiah Willard Gibbs en el siglo xix; en la teoría de la información por Claude Shannon, trabajador de los Laboratorios Bell, en 1948; y en la teoría cuántica de la información por el físico teórico John von Neumann en 1932. Estas entropías no solo cuantifican nuestra ignorancia, sino también la eficiencia que es posible alcanzar al realizar tareas de procesamiento de la información (como comprimir datos) o termodinámicas (como propulsar un coche).

Identificar nuevas funciones de entropía para los sistemas cuánticos a pequeña escala es una de las principales tareas de los teóricos del *steampunk* cuántico. Supongamos que queremos usar el entrelazamiento para compartir información a través de un determinado canal; podríamos preguntarnos si existe algún límite teórico a la eficiencia con la que podemos hacerlo, y es probable que la respuesta dependa de algún tipo de entropía.

Otro objetivo del *steampunk* cuántico es construir lo que los físicos llaman teorías de recursos, las cuales ponen de relieve las limitaciones bajo las que operamos. Por ejemplo, la primera ley de la termodinámica nos obliga a conservar la energía: no podemos crearla ni destruirla, solo transformarla y transferirla de un sistema a otro. Los físicos pueden intentar modelizar matemáticamente las situaciones donde existe una restricción (como una temperatura ambiente fija) mediante una teoría de recursos, y luego usar esta para calcular la máxima eficiencia con la que se puede llevar a cabo una tarea.

Una tercera área de interés en nuestro intento de actualizar la termodinámica es derivar las denominadas relaciones de fluctuación. Estas ecuaciones, que son extensiones de la segunda ley de la termodinámica, gobiernan los sistemas pequeños sujetos a fuerzas grandes y nos dan información sobre el trabajo realizado por dichas fuerzas.

En 1996, Christopher Jarzynski, actualmente en la Universidad de Maryland, demostró una de las relaciones de fluctuación más conocidas. Quienes trabajan en termodinámica se refieren a ella como la igualdad de Jarzynski, aunque él es muy modesto y nunca emplearía ese nombre. Los físicos experimentales usan esta identidad para medir una determinada propiedad termodinámica de los sistemas pequeños. Imaginemos una cadena de ADN flotando en el agua y a la misma temperatura que su entorno. La cadena tiene cierta energía libre, que básicamente es la energía de la que dispone un sistema para realizar trabajo. Por medio de láseres, los científicos pueden atrapar un extremo de la cadena y tirar del otro durante un tiempo, tras lo cual el ADN vuelve a la temperatura de la solución, pero con una cantidad distinta de energía libre. Esta diferencia de energía libre tiene aplicaciones en química, farmacología y biología, y podemos calcularla tensando la cadena muchas veces y midiendo el trabajo requerido en cada intento. Luego solo hay que introducir los datos en la igualdad de Jarzynski y resolver la ecuación.

Jarzynski y yo nos preguntamos cuántos experimentos habría que realizar para calcular la diferencia de energía libre con una precisión dada. Estimamos el número mínimo de intentos que se necesitarían y propusimos un esquema para cuantificar la precisión, empleando la teoría de la información a pequeña escala. En otro trabajo reciente, mis colaboradores y yo demostramos que las relaciones de fluctuación y las nuevas funciones de entropía son dos formas coherentes de abordar la termodinámica a pequeña escala, y usamos cada método para clarificar el otro. Expertos en termodinámica cuántica de Londres, Colonia y otros lugares han ampliado y refinado esta línea de investigación.

UN NUEVO MOTOR CUÁNTICO

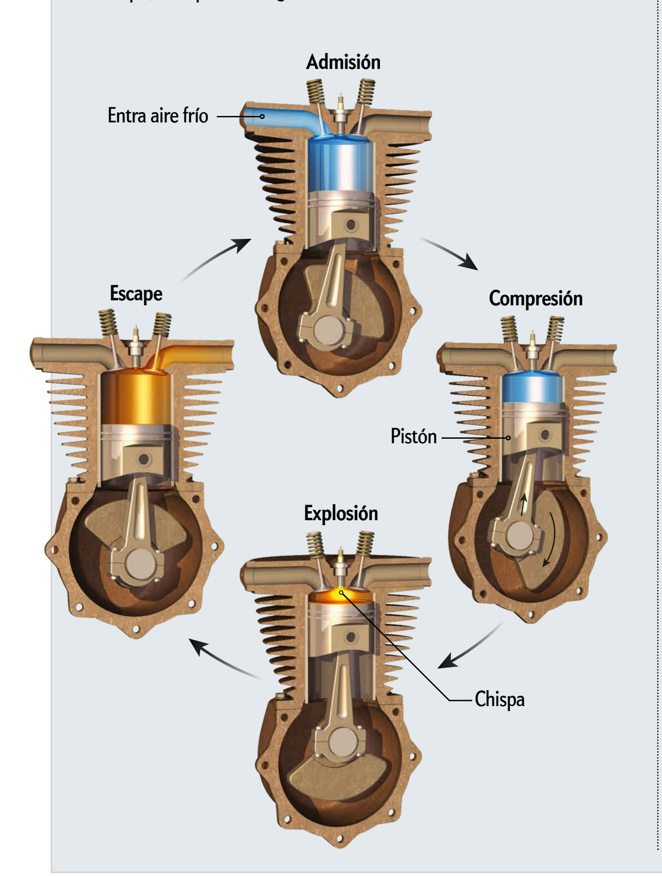
Así como la termodinámica tradicional ayudó a describir la física de las máquinas de vapor, nuestros esfuerzos por comprender la

Diseñar un motor cuántico

La termodinámica surgió en la era de la máquina de vapor. Los investigadores del *steampunk* cuántico tratan de actualizar esa rama de la física para aplicarla a dispositivos cuánticos como el que se muestra aquí: un motor cuántico basado en una fase de la materia conocida como localización de muchos cuerpos (LMC) y concebido como un experimento mental, aunque podría construirse en un futuro cercano. Igual que el motor de un automóvil completa un ciclo de cuatro tiempos que impulsa el vehículo, este «LMC-móvil» pasa por un proceso cuántico de cuatro etapas para producir trabajo.

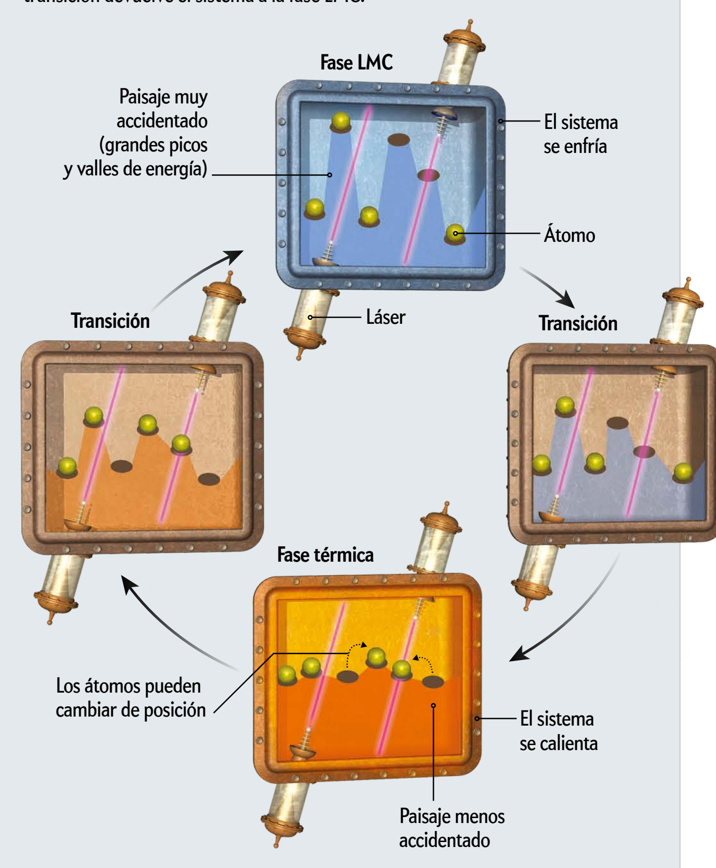
Motor de explosión de un automóvil

El motor de un coche toma aire frío y expele aire caliente en un ciclo de cuatro tiempos. En la fase de admisión, el aire frío y la gasolina entran en el cilindro. Durante la compresión, el pistón sube y comprime la mezcla. Entonces ocurre la explosión: la bujía produce una chispa que enciende la mezcla, y la combustión empuja el pistón hacia abajo y mueve las ruedas del coche. Por último, durante el escape, se expulsan los gases calientes de la combustión.



Motor cuántico (LMC-móvil)

El LMC-móvil también completa un proceso de cuatro etapas, que comienza con los átomos en la fase de localización de muchos cuerpos. Los átomos, situados en un «paisaje» con pronunciados picos y valles de energía, se enfrían para evitar que se muevan demasiado. Luego cambiamos la configuración de los láseres para aplanar el paisaje. El motor entra entonces en una fase térmica en la que los átomos pueden moverse, y absorbe calor. Una última transición devuelve el sistema a la fase LMC.



termodinámica cuántica pueden ser útiles para inventar motores cuánticos. Los físicos experimentales ya han creado este tipo de dispositivos con fotones (partículas de luz), sistemas electrónicos y qubits superconductores (circuitos cuánticos en los que la corriente puede fluir eternamente sin disiparse).

Hace poco diseñé un nuevo motor cuántico en colaboración con Christopher D. White, actualmente en la Universidad de Maryland, Sarang Gopalakrishnan, que ahora trabaja en la Universidad de la Ciudad de Nueva York, y Gil Refael, del Instituto de Tecnología de California. Al ser físicos teóricos, primero concebimos nuestro motor como un experimento mental. Pero también estamos investigando cómo se podría construir una versión real del motor a partir de las herramientas cuánticas disponibles en los laboratorios actuales. Así, nuestro diseño podría llevarse a la práctica enfriando átomos, y atrapándolos y manipulándolos con láseres.

En nuestro motor interviene una fase de la materia denominada localización de muchos cuerpos (LMC), una variante de las fases sólida, líquida y gaseosa. Las partículas cuánticas pueden estar en esa fase si se repelen entre sí y tienen la posibilidad de saltar lentamente a través de un «paisaje energético» irregular, abrupto y aleatorio. Un aspecto crucial de un sistema en fase LMC es que no se encuentra en equilibrio térmico. Las partículas en equilibrio exploran todo el espacio disponible de forma rápida y aleatoria; así, si dejamos que el vapor inspeccione una región durante un largo período de tiempo, sus propiedades

GEORGE RETSECK

macroscópicas (como la temperatura y el volumen) se estabilizarán y ya no sufrirán grandes cambios.

Pero las partículas de un sistema en fase LMC, a diferencia de las del vapor, permanecen en una misma zona en vez de moverse de un lado a otro. La falta de equilibrio térmico constituye un recurso útil en los procesos termodinámicos: así, los motores de los coches se basan en la presencia de dos fluidos, uno caliente y otro frío, que no están en equilibrio térmico porque las partículas calientes se hallan en un lugar y las frías en otro: ninguna de ellas explora todo el espacio. El motor de un automóvil saca partido de la falta de equilibrio térmico, y nosotros también aprovechamos esta propiedad de la fase LMC al diseñar nuestro motor cuántico, que bautizamos como «LMC-móvil».

El motor de explosión de un coche completa un ciclo de cuatro tiempos, al final del cual vuelve a su estado inicial, tras propulsar el vehículo gracias a la transferencia de energía desde el fluido caliente al frío. El LMC-móvil también atraviesa un proceso de cuatro etapas, donde los átomos pasan de una fase térmica (en la que las partículas pueden distribuirse por todo el espacio) a una fase LMC, y viceversa. Eso se logra cambiando la configuración de unos láseres, para transformar el paisaje energético en el que se mueven las partículas y hacerlo más plano o más accidentado. Antes de cada transición, el motor intercambia calor con el entorno: en su fase térmica interacciona con un entorno caliente, mientras que en la fase LMC lo hace con uno frío. En resumen, las cuatro etapas del ciclo son: 1) intercambio de calor con un entorno caliente en la fase térmica, 2) transición de la fase térmica a la LMC, 3) intercambio de calor con un baño frío y 4) transición de la fase LMC a la térmica.

Para evaluar el funcionamiento del LMC-móvil, estimamos su potencia y eficiencia, y las comparamos con las de otros motores. Por ejemplo, algunas bacterias poseen flagelos, colas largas y flexibles que rotan impulsadas por pequeños motores. ¿Cómo se comportan en relación con el nuestro? Según los cálculos, el LCM-móvil es capaz de producir aproximadamente diez veces más potencia que un flagelo. ¿Y si comparamos nuestro motor cuántico con el de un coche? A partir de la densidad de potencia (la potencia por unidad de volumen) de ambos, concluimos que el motor de un automóvil usa el espacio de manera más eficaz, pero solo unas diez veces más que el nuestro.

La fase LMC confiere cuatro ventajas a nuestro motor. La primera es que puede tener cualquier tamaño, desde diez partículas a infinitas. Para construir un motor grande, fabricaríamos y juntaríamos muchas réplicas de un minimotor de diez partículas. Si estos pequeños motores se comportaran térmicamente, interferirían entre sí, porque las partículas podrían pasar de uno a otro. Pero las propiedades de la fase LMC garantizan que cada minimotor funciona de forma independiente, así que es posible apiñar muchos para construir un motor con una alta densidad de potencia. Esta es la segunda ventaja del LMC-móvil.

La tercera ventaja se hace patente cuando usamos el motor muchas veces. En algunos intentos el motor realizará trabajo, pero en otros pocos absorberá calor (lo contrario a lo que se espera de él). Estos casos no deseables son menos frecuentes cuando el motor opera entre una fase térmica y otra LMC que cuando lo hace siempre en la fase LMC. Finalmente, la fase LMC aumenta la fiabilidad del motor, ya que permite que la cantidad de trabajo producida varíe menos de un intento satisfactorio a otro.

Nuestro éxito con el LMC-móvil, al menos en los experimentos mentales, apunta a que la fase LMC podría tener otras aplicaciones termodinámicas. Por ejemplo, si invertimos el ciclo, el motor debería actuar como un refrigerador, transfiriendo calor del entorno frío al caliente. Sabemos que ciertas propiedades cuánticas, como el entrelazamiento, solo se manifiestan a temperaturas muy bajas, y un refrigerador de este tipo podría servir para enfriar sistemas cuánticos con muchas partículas. Algunos científicos también han propuesto usar la fase LMC para almacenar energía. Y mis colaboradores y yo estamos tratando de crear una versión real de nuestro motor usando otro tipo de herramientas: bits cuánticos superconductores en un campo magnético. Las oportunidades abundan cuando aplicamos las ideas del *steampunk* cuántico a la ciencia de materiales.

MIRAR A TRAVÉS DE UN MONÓCULO CUÁNTICO

Si un aficionado al *steampunk* mirase al futuro a través de un monóculo, ¿qué vería? Que se está materializando un conjunto de herramientas matemáticas y físicas en la intersección entre la teoría cuántica, la teoría de la información y la termodinámica. Además, estamos trabajando para llevar esas herramientas a otras esferas científicas: la ciencia de materiales (como en el caso del LMC-móvil), la química, la física de altas energías (en particular, los agujeros negros y el tejido del espaciotiempo), la óptica, y la física atómica y molecular.

Cualquier tecnología demanda aplicaciones. La mayoría del trabajo relacionado con el *steampunk* cuántico es teórico, aunque cada vez hay más experimentos reales. Y la termodinámica cuántica, de los sistemas pequeños y de la información debería abrir la puerta a nuevos inventos, del mismo modo que el desarrollo de la termodinámica ayudó a impulsar la Revolución Industrial. Los motores LMC no propulsarán nuestros vehículos esta década, pero los interruptores moleculares, colectores de energía solar y transistores que disipan calor son dispositivos a pequeña escala vinculados a la termodinámica y deberían guiar la teoría.

Otro reto consiste en unificar las diferentes líneas de investigación y herramientas desarrolladas por los investigadores del *steampunk* cuántico, que incluyen nuevas entropías, teorías de recursos, relaciones de fluctuación o motores termocuánticos. Conciliar las definiciones y resultados de estas áreas servirá para consolidar una teoría de la termodinámica cuántica.

La termodinámica nos evoca el aceite y la carbonilla del motor, la emoción de atravesar los campos y surcar los mares en los primeros trenes y barcos de vapor, o de admirar el paisaje desde un globo aerostático. La ciencia de la información cuántica está cambiando nuestra manera de entender la computación, la comunicación, la criptografía y las mediciones. Está usted leyendo acerca de esta confluencia de lo viejo con lo nuevo en *Investigación y Ciencia*, pero bien podría tratarse de una novela de H. G. Wells o Julio Verne. IyC

PARA SABER MÁS

Quantum steampunk: Quantum information, thermodynamics, their intersection, and applications thereof across physics. Nicole Yunger Halpern. Tesis doctoral, Instituto de Tecnología de California, 2018. Disponible en **https://arxiv.org/abs/1807.09786**.

Quantum engine based on many-body localization. Nicole Yunger Halpern et al. en *Physical Review B*, vol. 99, n.º 2, art. 024203, enero de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Motores moleculares. R. Dean Astumian en *IyC*, septiembre de 2001.

El largo brazo de la segunda ley. J. Miguel Rubí en *IyC*, febrero de 2009.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



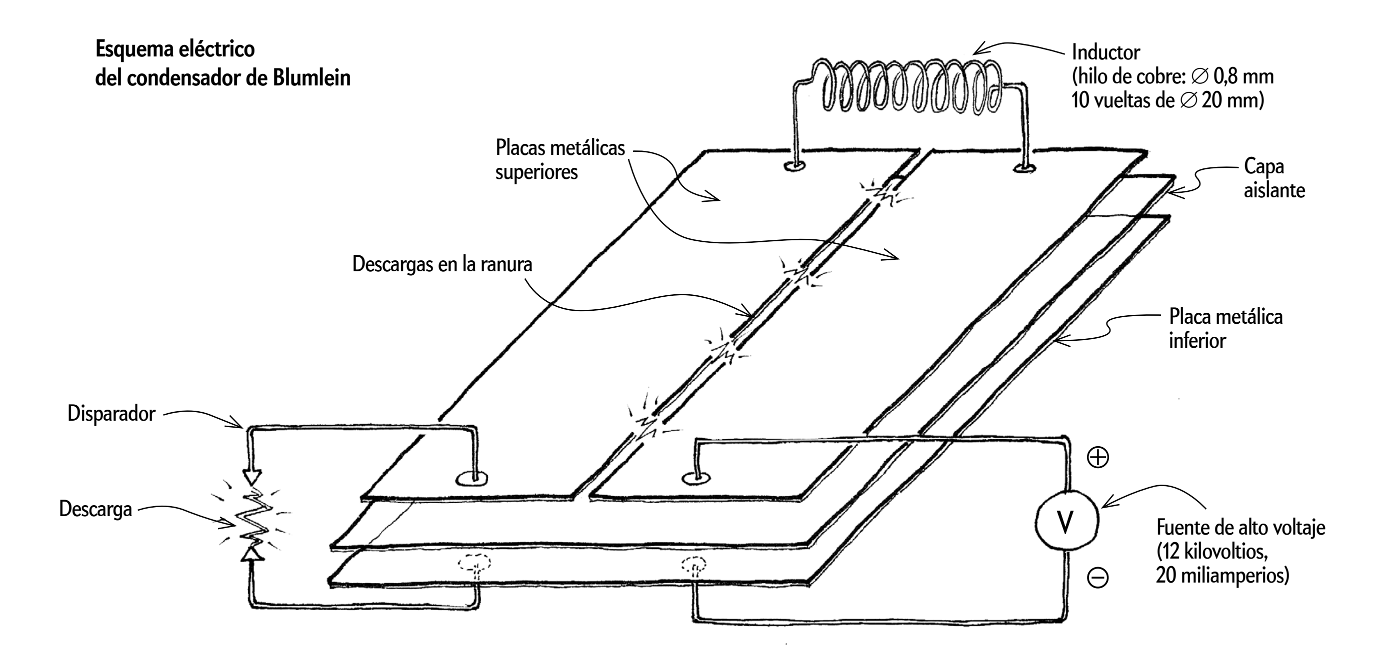
El láser ultravioleta de nitrógeno (I)

La construcción de un láser casero nos permite descubrir fenómenos eléctricos tan interesantes como el condensador de Blumlein

MONTAJE DEL LÁSER casero de nitrógeno (algunos elementos, como la cámara de descarga y los electrodos, se explicarán en la próxima entrega).

Entre los años sesenta y setenta del siglo pasado, el mundo científico y tecnológico vivía inmerso en una pequeña revolución. El láser (acrónimo de *light amplification by stimulated emission of radiation*), que es como se llama al dispositivo capaz de emitir radiaciones electromagnéticas coherentes, evolucionaba a toda velocidad y encontraba aplicaciones en los más diversos ámbitos. Lógicamente, los científicos aficionados no estaban al margen de ese progreso. Al contrario, con los años, el mundo de la ciencia de garaje demostró ser un excelente campo de cultivo para el desarrollo de láseres de lo más curiosos. Los primeros proyectos que se acometieron a nivel *amateur* consistieron en la replicación de los aparatos de la alta ciencia, pero pronto surgieron diseños originales por su simplicidad y lo espartano de su construcción. El que hoy traemos a estas páginas es quizás el más clásico de entre todos ellos: el láser de nitrógeno a presión atmosférica.

Antes de entrar en los aspectos puramente constructivos, permítanme hacer una brevísima explicación, poco canónica, sobre las propiedades de estos instrumentos. Un láser es una «bombilla» muy es-



pecial. Para empezar, no emite luz en casi todas las direcciones, como suelen hacer las lámparas. El láser es direccional y concentra toda la radiación en un fino haz de mínima divergencia. En segundo lugar, tampoco emite luz en un amplio espectro, como hacen casi todos los radiadores ópticos. El láser produce radiaciones casi monocromáticas o, como mucho, limitadas a unas pocas frecuencias del espectro óptico. Más aun, a diferencia de todas las bujías que nos iluminan desde el paleolítico, que emiten cuantos de luz al azar, el láser lo hace de forma sincronizada: la emisión consiste en trenes de ondas perfectamente coherentes. Finalmente, debemos destacar que, además de todo lo anterior, la luz que emite un láser suele estar polarizada, es decir, que las ondas luminosas vibran solo en un plano.

La combinación de todas estas particularidades convierte a este sistema de generación óptica en una herramienta potentísima. Su desarrollo no fue fácil. Tras una carrera que había ocupado a investigadores y laboratorios durante varios años, en 1960 se consiguió fabricar el primer láser operativo. Los primeros funcionaban por bombeo óptico. Se situaba una varilla de rubí sintético en las proximidades de una lámpara de *flash* superpotente. Cada ráfaga de luz estimulaba la emisión, en el seno del rubí, de radiación luminosa en el lado rojo oscuro del espectro, coherente, monocromática, polarizada y muy concentrada.

En los años siguientes, la producción de radiación láser se consiguió mediante los más variados métodos de bombeo o excitación. Llegaron luego la estimulación eléctrica, la electrónica, la química, la gasodinámica y otras más. Asimismo, se logró en las más diversas sustancias: cristales, gases, gases moleculares, vapores metálicos, colorantes orgánicos, etcétera. Hoy disponemos de láseres desde el ultravioleta más duro al infrarrojo lejano, con potencias que van de los milivatios a los megavatios, capaces de mantener diminutas partículas en suspensión o de medir la distancia hasta la luna.

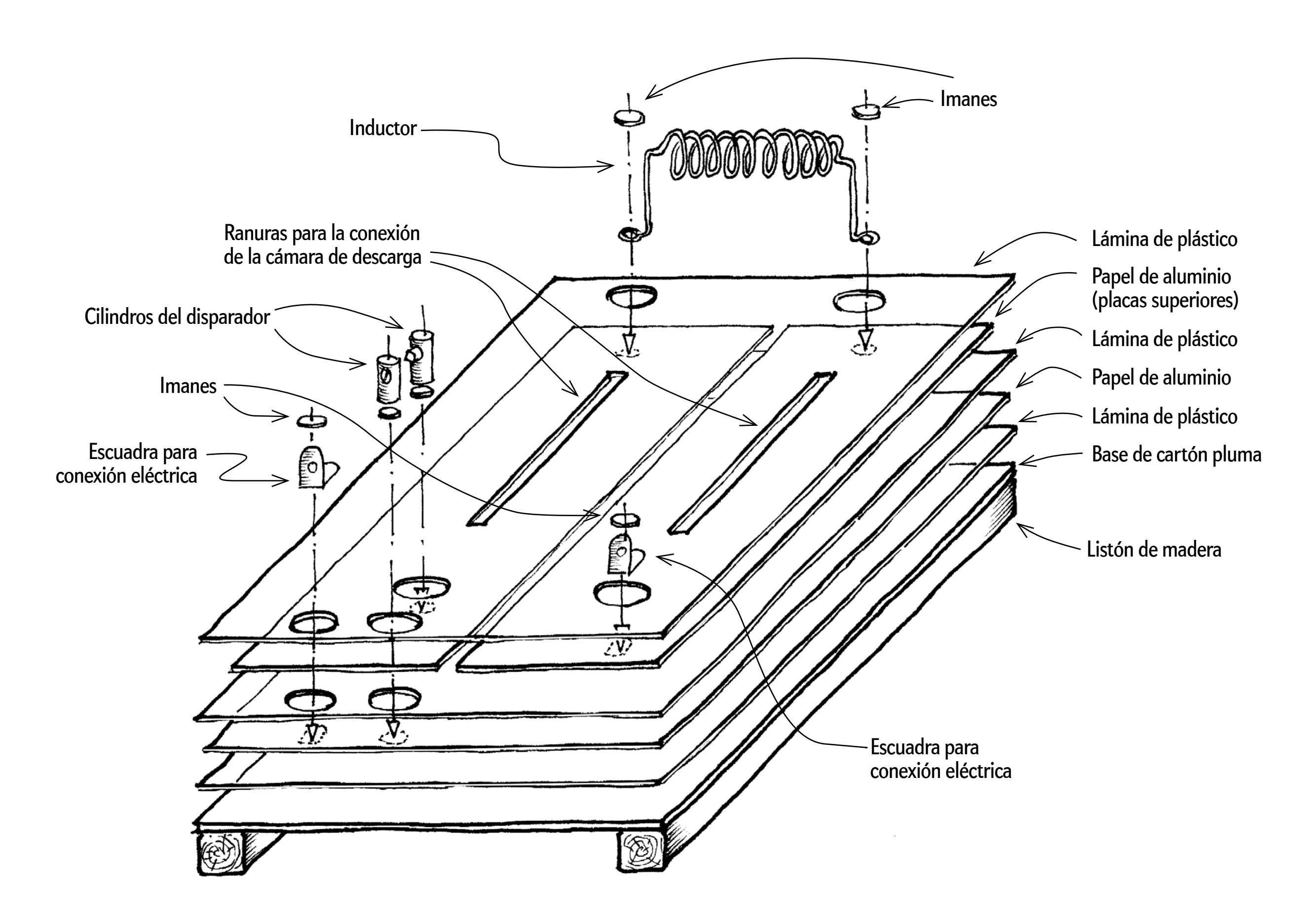
Quizá por todo ello, el láser sigue ofreciendo un campo fértil para el amante de la ciencia experimental. Si bien la construcción casera de un láser plantea todo un reto, es posible. Y ello se lo debemos, sobre todo, a James S. Small, quien, a principios de los setenta, siendo un joven graduado en física por el Instituto de Tecnología de Massachusetts, desarrolló y patentó un láser de nitrógeno de gran simplicidad. Así pues, nos proponemos la construcción de una versión todavía más simple y ligeramente modernizada de ese aparato, como paso previo a la acometida de proyectos más complejos. Para poder explicar con mayor detalle el proceso, le dedicaremos dos entregas. La primera se centrará en la construcción de la parte electrónica. La segunda incluirá la construcción de la cámara de descarga, así como la fase de ajustes y mejoras.

La fuente de alta tensión

Lo primero y fundamental es disponer de una fuente de alimentación de alta tensión de corriente continua. Varias son las posibilidades. La más segura es una fuente de las de laboratorio de enseñanza secundaria. La que tengo en mi taller proporciona 12.000 voltios con una intensidad de 20 miliamperios. Una segunda opción —infinitamente más peligrosa— es servirse de un transformador para rótulos de neón, un clásico entre los científicos aficionados que debe manejarse con mucho, mucho cuidado [*véase* «Auroras boreales caseras», por Marc Boada Ferrer; *Investigación y Ciencia*, junio de 2018]. Pero hay más. Algunos experimentadores modifican el transformador de un viejo tubo de televisión, e incluso utilizan máquinas de influencia o de fricción, como los generadores de Wismurth o de Van der Graff. Sea como fuere, con nuestro manantial de alta tensión instalado en el laboratorio podremos pasar a los subsistemas siguientes.

El condensador de Blumlein

Aclaremos antes que la producción de radiación láser mediante el nitrógeno atmosférico se consigue solo sometiendo este a una potente descarga eléctrica. De hecho, debe ser tan potente que nuestra fuente de alimentación no bastará. Necesitamos un pico de tensión extremadamente intenso y, por tanto, extremadamente corto. Ello se consigue con un arreglo electrónico más que interesante: el dispositivo o condensador de Blumlein (*Blumlein switching*). Este aparato —que por sí mismo ya es tan interesante que vale la pena construirlo—, no es más que un condensador eléctrico que se carga lentamente, durante unas décimas de segundo, y se descarga muy rápido, en unos pocos nanosegundos. Es decir, el condensador entrega toda la ener-



gía almacenada en unas cien millonésimas partes del tiempo que tardó en cargarse. Por tanto, el pico de energía asciende a kilovatios (o incluso más, en los modelos de gran tamaño). ¿Cómo se consigue esto? Pues con un curioso método que debemos al científico e inventor Alan Dower Blumlein.

Observemos el esquema eléctrico. Tenemos una placa metálica inferior y dos placas metálicas superiores conectadas a la fuente de alta tensión. Entre las de arriba y la de abajo se encuentra una capa aislante, con lo que se configura un condensador. Fijémonos en ciertos detalles. El primero es que las dos placas de arriba están conectadas entre sí mediante una espiral de cobre, llamada inductor, que es conductora; por tanto, las dos placas se cargan a la vez. El segundo detalle esencial es que las dos placas están separadas por una distancia muy corta. Finalmente, comprobaremos que existe un mecanismo que llamamos disparador, que consiste en dos puntas metálicas muy juntas y conectadas una a la placa metálica inferior y la otra a una de las placas metálicas superiores.

Confieso que me costó bastante entender el curioso funcionamiento de este dispositivo, pero su comprensión es esencial para la construcción de nuestro láser y para muchas otras aplicaciones de la alta tensión. Intentemos visualizar el fenómeno Blumlein. Cuando conectamos la fuente de alta tensión a las placas del condensador, estas se cargan progresivamente de electricidad; la carga va aumentando hasta que llega un momento en que en el disparador salta una chispa. Se ha producido una descarga disruptiva, casi instantánea, entre la placa inferior y una de las superiores; la descarga es tan rápida que la otra placa superior, para mantener la misma carga que su compañera, debe entregarle, rápidamente, toda la energía acumulada. Pero hay un obstáculo: el inductor.

Observemos que, mientras las placas se cargan lentamente, por el inductor circula solo una baja intensidad (la que proporciona la fuente). Pero observemos también que, cuando en el disparador salta la chispa, por el inductor debería circular una gran carga en un lapso de tiempo muy breve. Ello hace que aparezcan en el inductor campos magnéticos inducidos —de aquí el nombre—, que frenan el desplazamiento de las cargas eléctricas. La resistencia al paso de la corriente por autoinducción es tan importante que las cargas eléctricas acaban encontrando un camino más fácil: saltan entre las dos placas superiores a través de la ranura que existe entre ellas.

La descarga en la ranura, un auténtico chispazo, es precisamente la que produce la emisión láser, ya que dispone de tanta energía que ioniza las moléculas de nitrógeno atmosférico que encuentra en su camino. Estas, excitadas electrónicamente, emiten luz en un breve pulso de unos pocos nanosegundos de duración, en el que la ganancia óptica de la descarga es tan grande que la emisión se vuelve superradiante, hasta convertirse en un fuerte *flash*. (A escala atómica, el proceso es complejísimo y su descripción escapa a nuestros objetivos, pero el lector interesado encontrará abundantísima literatura al respecto.)

Ahora que ya sabemos cuál es el mecanismo de acción del conjunto de los condensadores, y antes de pasar a la parte constructiva, aclaremos que, en la práctica, la descarga no se producirá entre las dos placas superiores del condensador, sino en unos electrodos alojados en una cámara especial. Pero esto ya lo explicaremos detalladamente en la próxima entrega.

Fase de construcción

Pasemos, por fin, a la construcción. Vamos a utilizar una técnica basada en apilar capas, cada una con un desempeño concreto.

Debemos tener en cuenta que las dimensiones del conjunto no son críticas; así pues, las que damos a continuación pueden variarse un poco en función de los materiales que tengamos a disposición. Aquí nos hemos basado en un formato muy próximo al que utilizó Small en su primer dispositivo: las dimensiones de una hoja DIN A3 (420 × 297 milímetros).

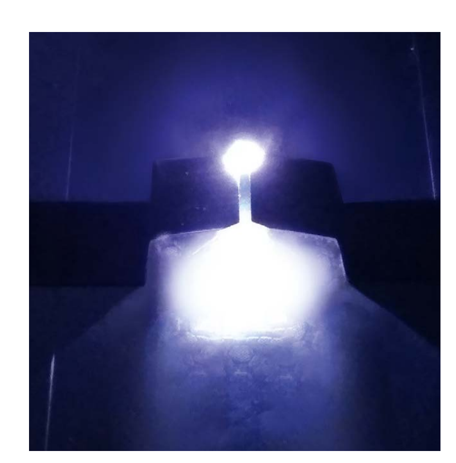
Tomemos un cartón pluma de tamaño DIN A3 de 5 milímetros de espesor; será la base de nuestro emisor láser. En su cara inferior podemos encolar un par de listones de madera de 2 × 2 centímetros de sección que aportarán rigidez al conjunto. Una vez seca la cola, colocaremos en la cara superior una placa aislante, ya que el papel es ligeramente higroscópico. Todas las placas aislantes las confeccionaremos con el mismo material y, como servirán también para el condensador, deben ser tan delgadas como sea posible. ¿Por qué? Pues porque cuanto más próximas están las dos placas de un condensador, más carga pueden acumular. Naturalmente, si son demasiado delgadas y la tensión es muy elevada, acaba por aparecer una descarga entre las placas del condensador que perfora la placa aislante y, por tanto, arruina el trabajo.

En mis primeras pruebas utilicé a modo de aislante polietileno transparente, del que se utiliza para forrar libros, de 0,06 milímetros de espesor. Producía unos chispazos espectaculares. Pero, tras varias perforaciones, trabajando a 12 kilovoltios, decidí pasarme al plástico que se utiliza para los marcos de fotografía. En este caso, me pasé de largo. Son placas de poliestireno, brillantes por una cara y mate por la otra, con un espesor de 1,15 milímetros. Quizás es un poco excesivo, ya que las descargas no son ni mucho menos tan potentes, pero funciona. Ahora utilizo hojas de acetato para encuadernar portafolios, que tienen un espesor de 0,18 milímetros. Óptimo. (Decimos esto para mostrar que el constructor tiene, de nuevo, un amplio margen de maniobra.)

Así pues, pondremos una hoja DIN A3 de acetato sobre el cartón pluma y sobre esta la primera lámina del condensador, que materializaremos con hoja de aluminio de uso doméstico, el de cocina. Esta hoja de aluminio debe ser algo más pequeña (*la diferencia de tamaños apenas puede apreciarse en el dibujo*), para dejar un margen limpio de 1 centímetro en todo el perímetro. Es importantísimo que trabajemos con limpieza, para que no quede ni una mota de polvo entre las capas que vamos aplicando, ya que serían puntos de fuga eléctrica y, por tanto, posibles perforaciones. Alisaremos la lámina de aluminio para poner sobre esta otra de acetato. Eso sí, tal y como vemos en el dibujo, a esta lamina plástica le recortaremos una ventana circular de 15 milímetros de diámetro para instalar una de las piezas del disparador.

Pasemos a otra capa y cortemos dos hojas de aluminio de 380 × 125 milímetros que serán las placas superiores del condensador. Las dispondremos perfectamente paralelas y separadas por una espacio de unos 15 milímetros. Pongamos ahora otra pieza de acetato, pero, atención, esta tiene seis ventanas. A un lado hay una abertura que es muy próxima a la que ya habíamos hecho en el acetato de más abajo, que será para el disparador y en la misma cara; al otro lado practicaremos otra ventana para la conexión a la fuente de alta tensión mediante una pequeña escuadra. Luego, al otro extremo, abriremos dos ventanas más, para colocar el inductor. Finalmente, en la zona central recortaremos dos largas ranuras por donde conectaremos la cámara de descarga a las placas superiores del condensador. Fijaremos el conjunto con algunas pinzas para papel y al final lo sellaremos con cinta adhesiva en todo el perímetro.

El remate de la parte eléctrica pasa por construir el disparador y el inductor. El primero será el encargado de producir las chispas, y lo fabricaremos a partir de unas tuercas especiales que encontraremos en la ferretería. Sirven para ensamblar muebles y disponen de un agujero roscado. Con dos de estas piezas, dotadas de dos tornillos terminados en punta o esfera, configuraremos este chispero que quedará fijado en su posición gracias a cuatro imanes, dos arriba unidos magnéticamente a las tuercas y dos más abajo, en el cartón de la base (*los de abajo no se muestran en el dibujo*). Haremos algo parecido con la inducción. Buscaremos alambre de cobre esmaltado de 0,8 milímetros de diámetro. Enrollaremos 10 u 11 vueltas sobre un cilindro de unos 18 milímetros y dejaremos unas patas de 60 u 80 milímetros de longitud que lijaremos para eliminar la laca aislante. Luego moldearemos en los extremos libres el alambre para hacer un círculo que colocaremos en las ventanas superiores del acetato y lo fijaremos con cuatro imanes más, de forma que tendrá un contacto eléctrico excelente con las dos placas de aluminio.



Llegados a estas alturas, podemos hacer una emocionante prueba previa. Ponemos una escuadra en cada una de las ventanas de alimentación y la fijamos con el sistema de los imanes. Ponemos luego un par de piezas de chapa delgada de aluminio en forma de Z sobre las placas superiores, dejando entre ellas un espacio de 4 o 5 milímetros. Conectamos la fuente de alta tensión a las escuadras y activamos el interruptor. Si todo va bien, un potentísimo chispazo saltará entre los electrodos en forma de Z (*fotografía*). ¡Nuestro condensador de Blumlein funciona perfectamente! Podemos pasar, pues, a la parte final de la construcción del láser. Pero eso será en la próxima entrega. IyC

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA FÍSICA

El camino hacia la electrodinámica de Maxwell

El valor (científico) de la amistad

José Manuel Sánchez Ron

James Clerk Maxwell (1831-1879) es uno de los grandes científicos de la historia. En física, es posible argumentar que únicamente Isaac Newton y Albert Einstein le preceden en una hipotética escala de excelencia. El mismo Einstein reconoció la importancia de algunas de las aportaciones de Maxwell en un libro que celebraba el centenario de su nacimiento: «Se produce entonces [mediados del siglo XIX] el gran cambio, que para siempre estará asociado a los nombres de Faraday, Maxwell y Hertz. En esta revolución, la parte del león corresponde a Maxwell. Demostró que el conjunto de lo que por entonces era conocido acerca de la luz y de los fenómenos electromagnéticos se podía expresar mediante su famoso doble sistema de ecuaciones en derivadas parciales, en las que los campos eléctrico y magnético aparecen como las variables dependientes».

Maxwell nació en Edimburgo, en el seno de una familia acomodada. En su momento, heredó una gran finca, Glenair, al suroeste de Escocia. Aunque estudió derecho, el principal interés de su padre, John Clerk Maxwell, era la tecnología. Sin embargo, no fue a su progenitor a quien James debió sus primeras enseñanzas: durante sus primeros ocho años de vida la mayor parte de la educación que recibió procedió de su madre, Frances Cay, quien en 1839 desgraciadamente murió de cáncer, la misma enfermedad de la que fallecería su hijo, cuarenta años más tarde.

Estudios universitarios

En noviembre de 1842 Maxwell comenzó sus estudios formales en la Academia de Edimburgo. Allí encontró algunos condiscípulos que se convirtieron en sus amigos para toda la vida. Uno de ellos fue Peter G. Tait (1831-1901), que llegó a ser catedrático de «filosofía natural» (el nombre con el que todavía se designaba en el Reino Unido a la física) en la Universidad de Edimburgo. A la amistad que mantuvo con Tait se sumó la de William Thomson (lord Kelvin a partir de 1892), catedrático en Glasgow y una de las figuras más notables de la física y la tecnología del siglo XIX. Los tres mantuvieron frecuentes intercambios epistolares. En sus cartas, Thomson y Tait firmaban como, respectivamente, *T* y *T'*, y Maxwell como *dp/dt*, puesto que en uno de los libros de Tait (*Sketch of thermodynamics*, 1868) la segunda ley de la termodinámica se escribía con las iniciales de Maxwell: *dp/dt=JCM* (donde *J* denotaba el equivalente mecánico del calor, *C* la función de Carnot y *M* el calor absorbido por unidad de volumen, manteniendo constante la temperatura).

Durante los cinco años que pasó en la Academia de Edimburgo, Maxwell dio muestras de su inteligencia: a la edad de quince años escribió su primer artículo científico, un trabajo sobre la geometría de curvas cónicas. En noviembre de 1847 entró en la Universidad de Edimburgo, donde siguió los tres primeros cursos de una carrera que constaba de cuatro. Esto quiere decir que no completó sus estudios y que, por consiguiente, no obtuvo ningún título. Semejante comportamiento ni fue involuntario, ni era infrecuente: se trataba de una maniobra habitual para poder estudiar en la más prestigiosa en ciencia de las universidades británicas de la época, la de Cambridge, que no admitía como alumnos a quienes ya poseyesen un título universitario.

En los años que pasó en la universidad escocesa, Maxwell no solo se dedicó a avanzar en sus estudios de física y matemáticas; también se interesó por la filosofía. A través de las cartas de juventud se puede comprobar que sus lecturas de filosofía fueron numerosas. En una de esas epístolas, fechada el 26 de abril de 1850 y dirigida a su amigo Lewis Campbell, mencionaba que se proponía leer, entre otras obras, la *Crítica de la razón pura* de Kant (en alemán) y el *Leviathan* de Hobbes.

En Cambridge, el título más prestigioso se obtenía a través de un competitivo examen denominado *Mathematical Tripos*. El alumno que obtenía los mejores resultados se convertía en *senior wrangler*, el siguiente en *second wrangler* y así sucesi-



JAMES CLERK MAXWELL

vamente. La mayoría de los principales físicos británicos que trabajaron entre, aproximadamente, 1820 y 1900, estudiaron en Cambridge y pasaron el *Mathematical Tripos*. A pesar de su gran capacidad en matemáticas y física, Maxwell, que se examinó en 1854, no fue *senior wrangler* sino *second*, detrás de Edward Routh, científico notable pero cuya obra en modo alguno se acercó a la suya.

Un año después de superar el *Tripos*, Maxwell fue nombrado miembro (*fellow*) de su colegio universitario, el Trinity. Aquello significaba la seguridad de poder continuar en Cambridge, con muy pocas obligaciones, dedicándose a investigar en lo que desease. Sin embargo, no utilizó mucho tiempo tal privilegio, ya que en 1856 pasó a ocupar la cátedra de filosofía natural del Colegio universitario Marischal de Aberdeen, en donde permaneció cuatro años. Fue entonces cuando contrajo matrimonio con Katherine Mary Dewar, hija del director del colegio. Katherine tenía siete años más que Maxwell y parece que su salud fue delicada, aunque sobrevivió a su esposo: falleció en 1886. No tuvieron hijos.

Electromagnetismo

En 1860 Maxwell tuvo que abandonar su cátedra de Aberdeen, debido a lo que ahora denominaríamos un «reajuste de plantilla», consecuencia de la unión del Colegio Marischal con el King, la otra institución universitaria de Aberdeen. Pero enseguida obtuvo una cátedra del Colegio King de Londres, en donde permaneció hasta 1865, un período que resultó muy provechoso para sus investigaciones sobre los fenómenos eléctricos y magnéticos.

Una cuestión importante es cuándo inició el estudio de esos fenómenos, más aún habida cuenta de que ni en Edimburgo ni en Cambridge había estudiado formalmente electricidad y magnetismo. Una carta que escribió a William Thomson el 13 de noviembre de 1854 ayuda a responder a tal pregunta:

Querido Thomson,

He sabido muy poco de ti desde hace tiempo, excepto a través de Hopkins y Stokes, pero supongo que estás trabajando en Glasgow como siempre. ¿Recuerdas una larga carta que me escribiste sobre electricidad, que he olvidado si te agradecí? Pronto me introduje en el tema, pensando al mismo tiempo en todas sus vertientes, y he sido recompensado últimamente encontrando que toda la masa de confusión está comenzando a despejarse bajo la influencia de unas pocas simples ideas [...]

Obtuve los principios fundamentales de la electricidad de tensión bastante fácilmente. Me ayudó mucho la analogía de la conducción del calor, que creo que es invención tuya, al menos no la he encontrado en ninguna otra parte. A continuación intenté obtener una teoría de atracciones de corrientes, pero aunque pude ver cómo se podrían determinar los efectos, no quedé satisfecho con la forma de la teoría que trata de las corrientes elementales y de sus acciones recíprocas, y no vi cómo se puede formar a partir de ella una teoría general. Leí este trimestre las investigaciones de Ampère [Théorie des phénomènes électro-dynamiques, uniquement déduite de l'éxperience, 1826] *y las admiré mucho, pero pensé que [las obtuvo, después de que] se hubiese convencido a sí mismo, [para] favorecer sus puntos de vista acerca de la indagación filosófica, y como un ejemplo de lo que debería ser [...] Ahora te he oído hablar de «líneas magnéticas de fuerza» y parece que Faraday hace gran uso de ellas, pero otros parecen preferir la noción de atracciones directas [esto es, acciones a distancia] de elementos de corrientes.*

Maxwell se refería a un trabajo que William Thomson publicó en 1842, en el que había demostrado que las ecuaciones que describen el flujo uniforme de calor en un medio homogéneo son formalmente idénticas a una versión de las ecuaciones que representan leyes de atracción que varían con el inverso del cuadrado de la distancia, como ocurre en la ley newtoniana de la gravitación universal. Semejante procedimiento no era, en última instancia, sino una forma de demostrar la equivalencia entre una acción a distancia y una acción continua (o, mejor, «contigua», correspondiente a la transmisión del calor en el medio homogéneo).

En una nueva carta que Maxwell dirigió a Thomson el 13 de septiembre de 1855, vemos que continuaba elaborando sus ideas, sin haber enviado a la imprenta ningún trabajo:

He obtenido mucho de ti en temas eléctricos, directamente al igual que a través de la imprenta y editor, y también he utilizado otras ayudas, y leído los tres volúmenes de investigaciones de Faraday [Experimental researches in electricity, 1839-1855]. *Mi intención al hacer esto era, naturalmente, saber lo que se ha hecho en la ciencia eléctrica, matemática y experimental, e intentar comprender esto de una manera racional, ayudándome de cualquier idea que pudiese atornillar en mi cabeza. Buscando tales nociones, me he encontrado con algunas ya preparadas, de las que me he apropiado. Entre estas se encuentran la teoría de la polaridad de Faraday, que adscribe esa propiedad a toda parte de una esfera de acción de los cuerpos magnéticos o eléctricos, también sus nociones generales sobre «líneas de fuerza».*

No fue hasta 1856 cuando Maxwell comenzó a publicar trabajos sobre las propiedades de los fenómenos eléctricos y magnéticos y la relación entre ellos. Ya solo el título de su primer artículo, «On Faraday's lines of force», revela la gran deuda que Maxwell tenía con Michael Faraday, más concretamente con la noción de líneas de fuerza que este había introducido en 1831, cuando demostró que la variación magnética producía electricidad, el efecto opuesto al que Oersted había encontrado en 1820. Y Faraday se dio cuenta del uso que Maxwell había hecho de su idea; así, en una carta datada el 25 de marzo de 1857, Faraday le agradecía el envío de «On Faraday's lines of force»:

Mi querido Sr.

He recibido su artículo, y se lo agradezco mucho. No me atrevo a agradecerle por lo que dice sobre «Lines of force», porque sé que lo ha hecho en el interés de la verdad filosófica; pero debe suponer que es un trabajo grato para mí, y que me anima mucho a seguir pensando. Al principio casi estaba asustado cuando vi tal fuerza matemática aplicada al tema, y entonces comencé a ver que todo sobrevivía bien.

El «susto» de Faraday tuvo que deberse a sus limitaciones matemáticas, una de las grandes diferencias que le separaba de Maxwell.

Por su parte, Maxwell escribía a Faraday el 9 de noviembre de 1857:

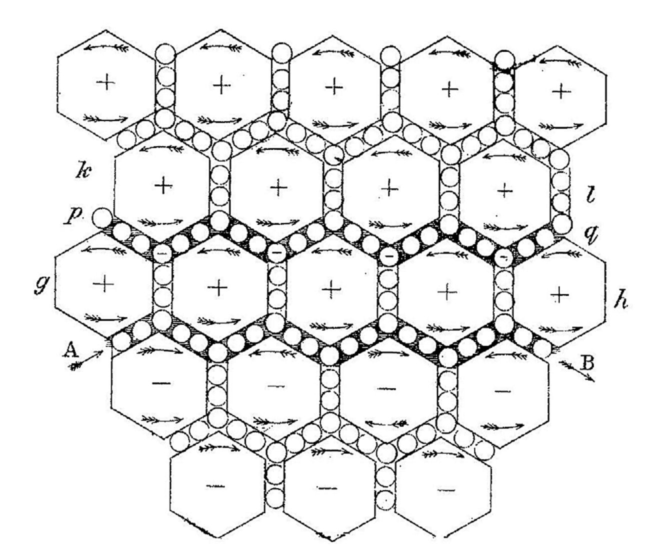
A mi entender usted es la primera persona en quien la idea de cuerpos que actúan a distancia, poniendo en estado de constricción el medio circundante, ha surgido como un principio en el que se puede creer realmente. Se nos han propuesto flujos de ganchos y anillos volando alrededor de los imanes, e incluso dibujos que los representan acosados de este modo; pero nada resulta más claro que sus descripciones de todas las fuentes de fuerza manteniendo un estado de energía en todo su alrededor [...] Parece que esté usted viendo las líneas de fuerza curvándose alrededor de los obstáculos, dirigiéndose rectas hacia los conductores o retorciéndose según ciertas direcciones en los cristales, y transportando consigo hacia todas partes la misma cantidad de poder atractivo, difundiéndose con mayor holgura o concentración según las líneas se ensanchen o compriman.

Finalmente, en una serie de artículos (titulados «On physical lines of force» y publicados entre 1861 y 1862), Maxwell llegó a su gran éxito, el que le ha asegurado la inmortalidad científica —aunque no hay que olvidar sus fundamentales contribuciones a la física estadística—: el conjunto de ecuaciones que gobiernan el medio continuo (campo electromagnético) que transmite las fuerzas eléctrica y magnética, electromagnética en realidad. Un punto importante es que en esos artículos Maxwell utilizó un método que antes había intentado seguir William Thomson: construir modelos mecánicos del campo electromagnético. El que le dio mejor resultado fue uno en el que el campo estaba compuesto por un conjunto de vórtices o torbellinos, entre los que se interponían capas de pequeños círculos, que representaban a la electricidad y que desempeñaban un papel parecido a rodillos de fricción entre los remolinos hidráulicos. En una carta que escribió a Thomson el 10 de diciembre de 1861 se refirió a estas estructuras:

Supongo que el «medio magnético» está dividido en partes pequeñas o células, estando compuestas las divisiones o células-paredes de un solo estrato de partículas, siendo estas partículas «electricidad». Supongo que la sustancia de las células es altamente elástica, tanto con respecto a la compresión como a la distorsión, y que la conexión entre las células y las partículas en las paredes de las células es tal que la rodadura es perfecta, sin que se produzca deslizamiento entre ellas, y que actúan entre sí tangencialmente.

Y a continuación se extendía en detalles sobre el modo en que esa estructura producía los efectos electromagnéticos observados. Explicaba también a Thomson que había calculado la velocidad de las «ondulaciones transversales» del campo electromagnético y había observado que era «muy próxima a la velocidad de la luz»:

Desarrollé las ecuaciones en el campo antes de tener sospecha alguna de la proximidad entre los dos valores de la velocidad de propagación de efectos magnéticos y el de la luz, de forma que creo que tengo motivo para creer que los medios magnético y luminífero son idénticos.



MODELO MECÁNICO del campo electromagnético basado en vórtices, que Maxwell publicó en *Philosophical Magazine* en 1861.

En las últimas líneas aparece otro de los grandes, e inesperados, hallazgos de Maxwell en la serie de artículos «On physical lines of force», un hallazgo con el que se unificaba la óptica con la electricidad y el magnetismo. Después de completar las dos primeras partes de su artículo, Maxwell había probado con la idea de dotar de elasticidad al modelo para intentar explicar los fenómenos electromagnéticos, de manera que se transmitieran mediante ondas (el campo electromagnético se ondulaba, era dinámico). Y al calcular la velocidad de esas ondas (a partir del cociente entre parámetros asociados a las fuerzas eléctricas y magnéticas), encontró el valor conocido para la velocidad de la luz. Más de siglo y medio después, todavía se puede apreciar la excitación que Maxwell debió de sentir cuando escribió: «Difícilmente podemos evitar la inferencia de que la luz consiste de ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos.» Fue la segunda gran unificación de la física, después de la que Newton introdujo en 1687 cuando demostró que la fuerza que hacía que los cuerpos cayesen en la Tierra y la responsable del movimiento de los cuerpos celestes era la misma: la gravitación universal. IyC

PARA SABER MÁS

The life of James Clerk Maxwell, with a selection from his correspondence. Lewis Campbell y William Garnett. Macmillan, Londres, 1882.
Origins of Clerk Maxwell's electric ideas. Dirigido por Joseph Larmor. Cambridge University Press, Cambridge, 1937.
The scientific letters and papers of James Clerk Maxwell (3 volúmenes). Dirigido por P. M. Harman. Cambridge University Press, Cambridge, 1990-2002.

EN NUESTRO ARCHIVO

El mundo de la termodinámica. Enrico Bellone en *Calor y movimiento*, Colección *TEMAS* de *IyC*, n.º 16, 1999.
El señor de la física. Simon Schaffer en *IyC*, junio de 2011.

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

La isla de Koch, los fractales keplerianos y el tétrix

Generalizaciones fractales en 3D de la trompeta de Torricelli

1. GENERALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL del triángulo de Sierpinski. En el límite fractal, esta figura, conocida como tétrix, presenta una superficie de área finita y volumen nulo.

GEORGE W. HART/WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

El mes pasado discutimos por qué el sólido de revolución que engendra la gráfica de la función $1/x$ al rotarla sobre el eje X levantó una tremenda polvareda intelectual entre matemáticos y filósofos del siglo XVII. La razón es que dicho sólido, conocido como trompeta de Torricelli, presenta una superficie de área infinita (algo que no sorprende, ya que la longitud de su eje de rotación no está acotada), pero encierra sin embargo un volumen finito, lo que contradice nuestra intuición geométrica.

Para arrojar luz sobre la cuestión construimos lo que denominamos el «pastel de Hilbert»: una especie de versión discreta, o a trozos, de la trompeta de Torricelli. Se trataba de un sólido formado por infinitos pisos cilíndricos de altura 1 y cuyos radios dependían de su posición n en la tarta, de modo que el enésimo cilindro tenía radio $1/n$. El área lateral del pastel era por tanto proporcional a la suma infinita de todos los radios $(1/n)$, la cual es divergente. Sin embargo, su volumen era proporcional a la suma infinita de los cuadrados de los radios $(1/n^2)$, la cual converge.

Al final comenté que dicha construcción, basada en la repetición infinita de un mismo cilindro reproducido en diferentes tamaños, rezumaba aires fractales y prometí que lo explicaría en esta columna. Vamos allá.

La isla de Koch

El matemático sueco Helge von Koch (1870-1924) es recordado por haber creado una de las primeras curvas fractales que se conocen: la famosa «isla de Koch». Para generarla, partimos de un triángulo equilátero de lado unidad, dividimos cada lado en tres partes iguales y sustituimos cada segmento central por otros dos de idéntico tamaño formando un diente. El resultado es una estrella de seis puntas y perímetro $3 \cdot 4 \cdot 1/3 = 4$ (*véase la tabla*). Después, repetimos esta transformación de los lados una y otra vez. En el límite de un número infinito de iteraciones, obtenemos la curva de Koch.

Si nos fijamos en la tabla, vemos que la iteración enésima del proceso nos da una curva formada por $3 \cdot 4^n$ segmentos de longitud $1/3^n$ y, por tanto, con perímetro $3 \cdot (4/3)^n$. La longitud de la curva de Koch viene dada por el límite de esta expresión cuando n tiende a infinito. Y dado que la potencia es de un número mayor que 1, dicho límite es divergente.

Así pues, aunque la isla de Koch ocupa una región acotada del plano y tiene por tanto un área finita (el lector puede demostrar que es $A = 0{,}6928...$), ¡su perímetro es infinito! Esto nos recuerda a la relación entre el área infinita y el volumen finito del pastel del Hilbert, solo que en una dimensión menos. Así que podemos preguntarnos: ¿existe una versión tridimensional de la isla de Koch?

Iteración	Curva	Número de lados	Longitud de cada lado	Perímetro
0		$3 \cdot 4^0$	$\frac{1}{3^0}$	3
1		$3 \cdot 4^1$	$\frac{1}{3^1}$	4
2		$3 \cdot 4^2$	$\frac{1}{3^2}$	$\frac{4^2}{3^1}$
3		$3 \cdot 4^3$	$\frac{1}{3^3}$	$\frac{4^3}{3^2}$
4		$3 \cdot 4^4$	$\frac{1}{3^4}$	$\frac{4^4}{3^3}$
...		...	...	...
n		$3 \cdot 4^n$	$\frac{1}{3^n}$	$\frac{4^n}{3^{n-1}}$

2. CONSTRUCCIÓN DE LA ISLA DE KOCH, uno de los primeros fractales conocidos. A partir de un triángulo equilátero, en cada paso se divide cada lado en tres partes idénticas y se reemplaza el segmento central por otros dos de igual longitud y en forma de punta.

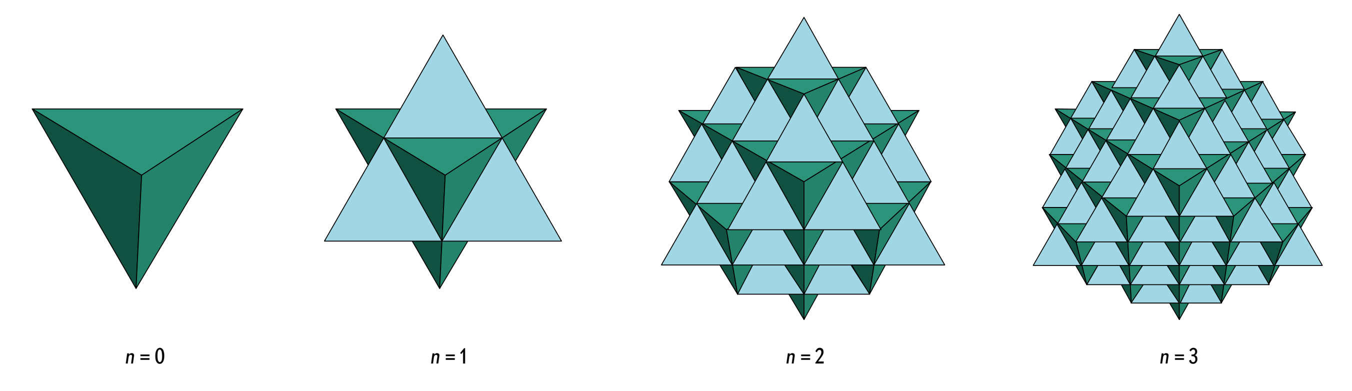
Versiones en 3D

En 1995, Hollister David propuso un par de ejemplos que bautizó con el nombre genérico de «fractales keplerianos» por sus reminiscencias con los poliedros de Kepler. Observemos la estrella octángula, el segundo sólido que aparece en la figura 3. Este puede entenderse como la composición de dos tetraedros. Pero también como un tetraedro al que hemos añadido otros cuatro, cada uno de ellos con una arista la mitad de larga que la del primero y situado sobre cada una de las caras del tetraedro original. Si lo interpretamos de esta última manera, ya tenemos la receta para construir nuestro fractal kepleriano: iterar el proceso.

En su artículo, David no calculó explícitamente el área ni el volumen de este fractal, pero sugería que ambos estaban acotados. Antes de seguir leyendo, les propongo como reto que piensen cómo calcularlos.

¿Ya lo tienen? En mi caso, para resolverlo he considerado que partimos de un tetraedro de arista unidad ($n = 0$) y que, en el paso n, añadimos T_n tetraedros de arista $1/2^n$, lo que da lugar a una superficie formada por E_n triángulos equiláteros de lado $1/2^n$. Así pues, en el paso $n + 1$ tendremos que añadir $T_{n+1} = E_n$ nuevos tetraedros de aristas $1/2^{n+1}$, lo que supone recubrir el sólido con un total de $E_{n+1} = 6E_n$ triángulos equiláteros de lado $1/2^{n+1}$. A partir de aquí solo falta encontrar los valores de T_n y E_n.

De nuestro tetraedro inicial obtenemos que $T_0 = 1$, con una arista de longitud 1 y una superficie formada por $E_0 = 4$ triángulos equiláteros de lado 1. Estas «condiciones iniciales» y las sencillas re-



3. EN 1995, Hollister David creó un par de versiones tridimensionales de la isla de Koch que bautizó como «fractales keplerianos». Esta imagen muestra las tres primeras iteraciones de la construcción de uno de tales fractales a partir de un tetraedro ($n = 0$). En la iteración enésima, sobre cada triángulo de la superficie del sólido se levanta otro tetraedro con arista reducida a la mitad.

laciones de recurrencia que acabamos de deducir, $T_{n+1} = E_n$ y $E_{n+1} = 6E_n$ arrojan los siguientes valores:

$T_0 = 1$ $\quad E_0 = 4$
$T_1 = 4$ $\quad E_1 = 6 \cdot 4$
$T_2 = 6 \cdot 4$ $\quad E_2 = 6 \cdot 6 \cdot 4$
... ...

Por tanto, vemos que $T_n = 4 \cdot 6^{n-1}$ (para $n \geq 1$) y $E_n = 4 \cdot 6^n$.

Si ahora deseamos calcular el volumen, nos basta con sumar las contribuciones de los tetraedros añadidos en cada etapa. Puesto que el volumen de un tetraedro de arista a es $(\sqrt{2}/12)\,a^3$, el volumen total de nuestro sólido kepleriano será

$$V_\infty = \frac{\sqrt{2}}{12}\left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} 4 \cdot 6^{n-1}\left(\frac{1}{2^n}\right)^3\right) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \,.$$

Para calcular el área en la enésima iteración, hemos de sumar las áreas de los $E_n = 4 \cdot 6^n$ triángulos equiláteros que lo forman. Dado que la superficie de un triángulo equilátero de lado a viene dada por $(\sqrt{3}/4)a^2$, el área total será

$$A_n = 4 \cdot 6^n \left(\frac{\sqrt{3}}{4}\right) \frac{1}{2^{2n}} \,,$$

que claramente diverge en el límite en el que n tiende a infinito. Por tanto, el área total de nuestro sólido kepleriano no está acotada.

Un sólido de volumen nulo

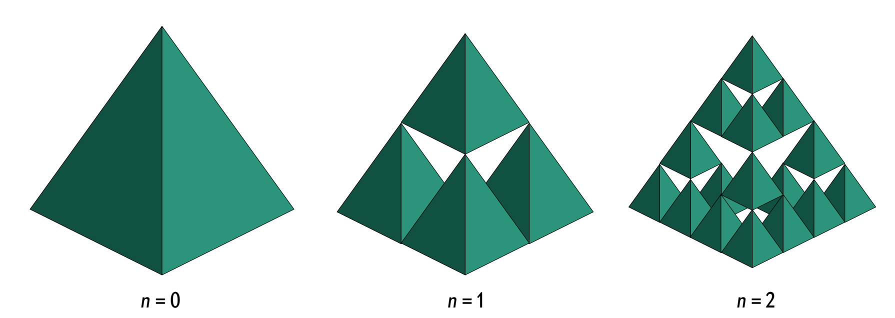
Esta «versión discreta» de la trompeta de Torricelli supera al pastel de Hilbert, puesto que consigue un volumen finito con área superficial infinita en un objeto que, sin embargo, tiene todas sus dimensiones acotadas (recordemos que el pastel de Hilbert constaba de infinitos pisos de altura unidad, por lo que su altura total era también infinita). Esto abre una serie de preguntas interesantes.

En la curva de Koch es imposible trazar una tangente en cualquiera de sus puntos. ¿Ocurre algo parecido en este sólido? ¿Podemos dibujar un plano tangente en alguno de los puntos de su superficie? Otra propiedad de la curva de Koch es que la distancia entre dos puntos cualesquiera es infinita, ya que en cada iteración la longitud del perímetro se multiplica por 4/3. ¿Será siempre infinita la longitud de cualquier trayectoria que tracemos sobre la superficie de nuestro fractal?

Para construir estos fractales hemos añadido a una superficie copias reducidas de ella misma una y otra vez. Para acabar, mencionaré que existe una curiosa alternativa para obtener fractales con propiedades semejantes: actuar «a la Sierpinski» [*véase* «El juego del caos», por Bartolo Luque; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2019] e ir vaciando el tetraedro inicial, tal y como se muestra en la figura 4.

Una manera más sencilla de entender el proceso tal vez consista en verlo como una transformación en la que, en cada iteración, hacemos cuatro copias del tetraedro con las aristas reducidas a la mitad y las colocamos tal y como indica el paso de $n = 0$ a $n = 1$ en la figura 4.

Al iterar infinitamente este proceso, obtenemos como resultado una versión tridimensional del triángulo de Sierpinski conocida como «tétrix». Les invito a que demuestren —no es difícil— que, cuando el número de iteraciones tiende a infinito, el área superficial del sólido permanece constante, pero ¡el volumen se hace cero!



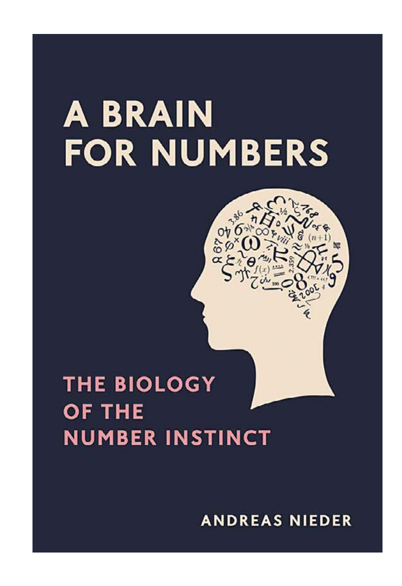
4. PRIMERAS DOS ITERACIONES de la construcción de un tétrix, el análogo tridimensional del famoso triángulo de Sierpinski. En cada iteración la superficie total se mantiene constante, pero el volumen disminuye en una proporción fija.

PARA SABER MÁS

Two fractals based on Keplerian solids. Hollister David en *Computers & Graphics*, vol. 19, págs. 885-888, noviembre de 1995.
Los fractales: Ni las nubes son esferas, ni las montañas son conos. Bartolo Luque en *Grandes ideas de las matemáticas*. Ediciones El País, 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

La gramática del crecimiento multicelular. Bartolo Luque en *IyC*, marzo de 2019.
La trompeta de Torricelli y el pastel nupcial de Hilbert. Bartolo Luque en *IyC*, junio de 2020.



A BRAIN FOR NUMBERS
THE BIOLOGY OF THE NUMBER INSTINCT
Andreas Nieder
MIT Press, 2019
392 págs.

Nacidos para contar

Un recorrido divulgativo por la base neurológica de las matemáticas con el que disfrutarán investigadores, docentes y neófitos

David Ruelle mostró en *El cerebro de los matemáticos* (Antoni Bosch, 2012) que era posible hacer una aproximación transdisciplinar y ecléctica al pensamiento matemático [*véase* «Hombres y matemáticas», por Pere Grima; Investigación y Ciencia, marzo de 2013]. Ruelle se centró entonces en la actividad del cerebro matemático bajo una perspectiva «externalista»; es decir, fundamentada en las teorías, logros prácticos, demostraciones e incluso dilemas éticos derivados del razonamiento de algunos de los grandes matemáticos de la historia. Sin embargo, entró poco en los entresijos neuronales que generan nuestra capacidad matemática. Si algún lector despistado se sintió engañado por el título de aquella obra, que no ahondaba en explicaciones ni justificaciones neurofisiológicas, ha llegado su libro.

A brain for numbers es un placentero viaje para los sentidos o, mejor, para todas las zonas de Brodmann implicadas en la percepción. Porque, en esta obra, Andreas Nieder ha sabido transmitir su pasión por la neurobiología mediante un texto transversal e inspirador que atraerá, sin duda, tanto a científicos como a educadores.

Nieder fundamenta su relato divulgativo en su experiencia como investigador, lo que supone una garantía de calidad. En su laboratorio de la Universidad de Tubinga, junto a sus doctorandos e investigadores posdoctorales (a quienes reconoce constantemente en la obra), Nieder ha determinado las áreas neuronales implicadas en las facultades numéricas. También ha demostrado que las representaciones numéricas en el cerebro son multimodales (o «supramodales», como él mismo subrayaría) y, en buena medida, compartidas filogenéticamente con otros primates no humanos [*véase* « ¿Calcular nos hace humanos?», por Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, noviembre de 2018]. Nieder explica de forma precisa y accesible sus experimentos, avalados por decenas de publicaciones especializadas, y los conecta con el estado actual de las investigaciones en neurobiología. Todo ello gracias a sucintas introducciones a los fundamentos de la neurofisiología, que los expertos sabrán saltarse, y a un inglés técnico muy fluido, sabedor de que se trata de una obra con un potencial público internacional y firme candidata a ser traducida a otras lenguas.

Nieder se centra también en el proceso de adquisición de los números y el cálculo y en los problemas de discalculia en la infancia. En este sentido, lo único que se echa de menos es algún capítulo dedicado a la pérdida del instinto numérico en procesos neurodegenerativos; un terreno en el que, no obstante, todavía hace falta mucha investigación y en el que el autor no ha profundizado tanto profesionalmente.

Recomiendo especialmente a los docentes que, tras esta lectura, revisen la concepción estándar que se ha establecido sobre la enseñanza de las matemáticas desde el parvulario. Los niños pueden hacer estimaciones y contar de forma general antes de aprender las palabras y los símbolos numéricos. Su manera de hacerlo, curiosamente, es más logarítmica que lineal: la linealidad se impone a medida que aprenden las palabras y los símbolos matemáticos y avanzan en el sistema educativo [*véase* «El paraíso logarítmico perdido», por Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, marzo de 2014]. En consecuencia, ¿matamos desde la escuela otras formas de contar? ¿Estamos marginando a estudiantes cuyo cerebro quizá cuente y calcule de otra manera? Nieder nos invita entre líneas a reflexionar sobre estas y otras muchas cuestiones pedagógicas.

Todo docente de matemáticas se habrá encontrado alguna vez con alumnos que experimentan problemas con el álgebra o el cálculo. En concreto, recuerdo a un estudiante que me insistía en que sabía hacer operaciones con potencias, que las comprendía, pero que se confundía con los símbolos. Por ejemplo, ante un producto de potencias del estilo $2^4 \cdot 2^3$ tenía serias dificultades pese a saberse la regla, y me decía: «¿Al sumar los exponentes, qué pasa con los dos doses? ¿Por qué no se añaden también?». No obstante, si la operación se le presentaba como $(2\cdot 2\cdot 2\cdot 2)\cdot(2\cdot 2\cdot 2)$, podía efectuarla sin problema alguno.

Nieder nos ayuda a desenmarañar la dimensión no simbólica de los números y el potencial de su relevancia cognitiva. Estoy convencido de que una parte de nuestros estudiantes de matemáticas pueden tener problemas con los símbolos matemáticos, sin llegar a la discalculia, y sin embargo saber realizar las operaciones que se les piden en el fondo de ese cerebro numérico que, poco a poco, vamos desentrañando.

A brain for numbers insiste también en la necesidad evolutiva de los números, mostrándonos claros ejemplos en otras especies y desmontando el mito simbólico: hay números y capacidad de conteo más allá de los símbolos numéricos humanos. Los animales pueden contar sin necesidad de símbolos, y eso les ha ayudado a sobrevivir. Que lo hagan en paralelo o con ciertas limitaciones no obsta para menospreciar sus facultades, que, en algunas tareas, pueden llegar a superar a las humanas. En definitiva, no es imprescindible ser una «especie simbólica», que diría Terrence Deacon, para usar y pensar números, aunque quizá sí para transformarlos, dibujarlos y crear representaciones semióticas y lingüísticas sobre ellos.

Los símbolos numéricos se inventaron en un momento de la historia de la humanidad y hoy se aprenden en las escuelas. Pero lo que nos cuenta Nieder es que ahora se han descubierto las neuronas numéri-

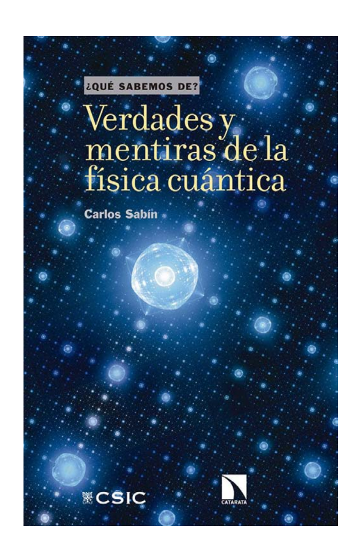
cas. Y, en este caso, la diferencia entre los verbos *inventar* y *descubrir* es enorme. Compartimos el instinto numérico con otras especies a las que rebasamos, ahora sí gracias a nuestro potencial simbólico, y más de forma cuantitativa que cualitativa, tal vez como también suceda con el lenguaje y con la técnica.

Por último, no les revelo el espectacular recorrido que traza Nieder al abordar el problema del «mágico número cero», desde sus orígenes históricos hasta los experimentos más recientes en la búsqueda de las «neuronas del cero». Como él mismo sostiene, «la historia del cero nos cuenta mucho sobre la mente y el cerebro». ¿Existe, pues, el cero, o es una fantástica invención humana? Hay, por cierto, un par de referencias ausentes en esta parte final de la obra: *La historia de las matemáticas*, de Ian Stewart (Crítica, 2012), cuyos contenidos también hubiesen venido bien en otros momentos del libro, y sobre todo la obra póstuma de Amir Aczel, *En busca del cero* (Biblioteca Buridán, 2016). Son sin duda dos viajes numéricos distintos, dos trayectos mucho más recientes en nuestra evolución, que, por otra parte, hubiesen aderezado y completado la perspectiva neurofisiológica del autor.

Nieder se ha zambullido en la evolución humana a través del método comparativo, demostrando la utilidad evolutiva de los números en otras especies y localizando explícitamente las áreas neuronales implicadas en el procesamiento, la comprensión y la producción numérica. Su libro nos invita así a retroceder millones de años para descubrir el trayecto de nuestro instinto numérico a través de un viaje introspectivo hacia las circunvoluciones cerebrales. Y lo hace con la madurez de un investigador consolidado, experto en la materia y con la curiosidad de un niño que se sigue «emocionando al escuchar las descargas neuronales» y experimentar la cercanía de «la mente trabajando en tiempo real». Son estos preciosos retazos poéticos, frescos y bien diseminados, que resultan poco habituales en otras obras de divulgación científica, de tendencia más aséptica.

En conclusión, no se pierdan el chisporroteo neuronal que se desparrama con la lectura de *A brain for numbers*. Su amígdala no se lo perdonaría.

—Antoni Hernández-Fernández
Universidad Politécnica de Cataluña



VERDADES Y MENTIRAS DE LA FÍSICA CUÁNTICA
Carlos Sabín
Catarata, 2020
96 págs.

Mecánica cuántica sin misterios

Una introducción amena y rigurosa a los usos y abusos de la teoría cuántica

Richard Feynman es sin duda uno de los grandes iconos científicos del siglo xx. Su estilo, alejado de la seriedad académica, y sus magníficas dotes de comunicador le convirtieron en una figura conocida más allá de los límites de la comunidad de físicos. Por ello mismo, como ocurre con frecuencia con las celebridades, sus escritos y anécdotas acabarían convirtiéndose en una fuente inagotable de aforismos.

Entre ellos hay uno que sobresale por lo a menudo que es citado por quienes se hallan descontentos con la teoría cuántica: «Creo que puedo decir con seguridad que nadie entiende la mecánica cuántica». Esta frase sirve a Carlos Sabín como punto de arranque de su libro *Verdades y mentiras de la física cuántica*, un interesante trabajo cuyo objetivo es explicar, a un lector no experto, no solo lo que es la mecánica cuántica, sino también —y quizá particularmente— lo que *no* es, así como guiarle por las prometedoras aplicaciones tecnológicas de esta rama de la física.

La elección de la frase de Feynman, tomada de sus lecciones recogidas en el libro *El carácter de la ley física*, no puede ser más acertada. Pocos de los que la citan para respaldar sus críticas a la mecánica cuántica parecen haber leído el párrafo en el que aparece y que clarifica su sentido. Feynman comienza diciéndonos que la dificultad con la mecánica cuántica es «psicológica» y se deriva de preguntarnos «cómo es posible que las cosas sean de esa manera». Su consejo frente a esto es «no hacer modelos» sobre lo que ocurre, sino aceptar que esa es la forma en que funciona la naturaleza. Así pues, la afirmación de que «nadie entiende la mecánica cuántica» hay que interpretarla en el sentido de que no es posible comprender lo que pasa en el mundo subatómico usando categorías derivadas de nuestra intuición macroscópica.

A pesar de la sabia advertencia de Feynman, la tendencia a «hacer modelos» es frecuente en las presentaciones populares de la mecánica cuántica. En libros y artículos resulta habitual leer que una partícula puede estar en varios sitios a la vez, o que un electrón puede comportarse alternativamente como onda o como corpúsculo. Muchas de las imágenes usadas son meros anacronismos, reliquias de los tiempos previos a la formulación de la mecánica cuántica en que los físicos, carentes aún de una teoría precisa, se valían de analogías clásicas debidamente modificadas *ad hoc* con algún ingrediente cuántico.

En la mayoría de los casos esto tiene una motivación puramente pedagógica, a fin de hacer llegar a un público no especializado las peculiaridades del mundo cuántico. Pero, por mucho que puedan capturar la imaginación del lector y despertar su interés, afirmaciones como las citadas quedan lejos de transmitir con precisión cómo funciona la naturaleza a las escalas más pequeñas. Antes bien, como nos recuerda Sabín, remiten a un mundo aparentemente mágico e impredecible en el que todo es posible. Por tan-

to, no puede sorprender que, fuera del dominio de la física, la teoría cuántica sea repetidamente invocada en la discusión de los temas más variopintos, desde el problema del libre albedrío a las pseudoterapias.

Verdades y mentiras de la física cuántica es un intento de desmontar las imágenes esotéricas o misteriosas de la teoría y de transmitir, de forma asequible y prescindiendo de analogías engañosas, su auténtico contenido y significado. En sus páginas leemos, por ejemplo, que un electrón no se comporta ni como una partícula clásica ni como una onda, sino como un electrón cuántico, sujeto a unas leyes bien definidas. A diferencia de lo que sucede en el mundo clásico macroscópico, los estados de los sistemas cuánticos no están determinados por simples números, sino por funciones. Estos objetos matemáticos, que por razones históricas reciben el nombre de funciones de onda, evolucionan con el tiempo de una manera perfectamente predecible. Su conocimiento no solo nos informa de los posibles resultados de futuros experimentos, sino de la probabilidad de que cada uno de ellos ocurra.

Ese carácter probabilístico es acaso la principal «dificultad psicológica», por usar la expresión de Feynman, con que se encuentran aquellos que se aventuran por primera vez en el mundo cuántico. La intuición macroscópica determinista nos induce a pensar que cualquier incertidumbre en el resultado de una medida (no achacable a errores experimentales) tiene que ser consecuencia de nuestra ignorancia acerca del sistema sobre el que trabajamos. Pero esto no es lo que ocurre con la mecánica cuántica: aunque la función de onda nos da toda la información posible, el resultado de un experimento, como medir la posición de una partícula, no está determinado de antemano.

Es precisamente para intentar dar cuenta de esta particularidad de la naturaleza que tan a menudo se usa el «modelo» de que la partícula se encuentra en varios sitios a la vez, decidiéndose de alguna manera por uno de ellos en el momento en que se produce la medida. Pero, como explica Sabín, esta imagen, aunque recurrente, es incorrecta. En ningún caso puede decirse que una partícula ocupe dos o más posiciones simultáneamente, por el simple hecho de que carece de sentido hablar de «dónde está» antes de que midamos su posición. Es una característica fundamental de los sistemas cuánticos que la propiedad que resulta de una medida no preexiste a la medición. Aceptar este hecho disipa gran parte de las «paradojas» cuánticas.

Pero el objetivo del libro no es solo clarificar las confusas ideas que circulan acerca de la mecánica cuántica, sino también explicar la esencia de sus leyes y la manera en que estas dan lugar a fenómenos imposibles en sistemas clásicos. Así, usando tan solo las propiedades de superposición de las funciones de onda y ahorrando al lector todo detalle técnico, se explica en qué consisten las correlaciones asociadas con el entrelazamiento cuántico y como estas jamás suponen la transmisión de información a velocidades superlumínicas. También se analiza el teletransporte cuántico, distinguiendo claramente este fenómeno físico de las ideas que el término evoca entre los aficionados al género de la ciencia ficción.

La última parte de *Verdades y mentiras de la física cuántica* está dedicada a discutir las aplicaciones tecnológicas de la teoría, con énfasis en tres campos: la computación, la criptografía y la metrología. Aunque concisa, la explicación introduce conceptos clave, como supremacía cuántica o computación cuántica adiabática, de una manera sencilla y rigurosa. Es sin duda de agradecer que el autor dedique algunas páginas a la discusión de las aplicaciones metrológicas de las tecnologías cuánticas. Aunque quizá menos conocidas para el público que la computación y la criptografía, no son por ello menos importantes ni prometedoras, en particular en campos como la astrofísica y la cosmología.

Una de las grandes virtudes de este volumen es su brevedad. En apenas noventa páginas, Sabín ha sabido destilar con claridad y precisión los temas básicos que permitirán al lector adquirir una idea general fidedigna de la física cuántica y prepararle para otras lecturas más detalladas. Esta concisión invita además a la relectura y a la reflexión sobre las ideas expuestas. Y aunque no hay duda de que se trata de una obra muy recomendable para cualquier persona interesada en estas cuestiones, el libro resultará particularmente estimulante a los seguidores de su blog, *Cuantos completos*, ya que encontrarán en él un estupendo vademécum.

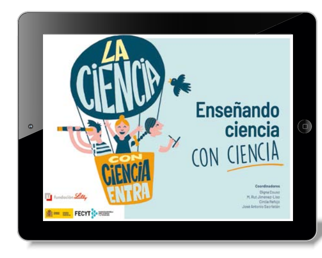
—Miguel Á. Vázquez-Mozo
Departamento de Física Fundamental
Universidad de Salamanca

NOVEDADES

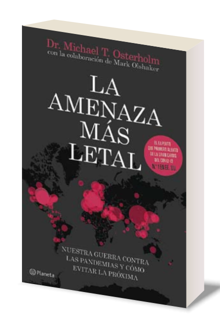
Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



ESPACIOS NATURALES PROTEGIDOS Y OTROS ENTES IMAGINARIOS
Juan Ors Martínez
Catarata, 2020
ISBN: 978-84-9097-932-7
192 págs. (17 €)



ENSEÑANDO CIENCIA CON CIENCIA
Coordinado por Digna Couso, M. Rut Jiménez-Liso, Cintia Refojo y José Antonio Sacristán
FECYT y Fundación Lilly, 2020
ISBN: 978-84-010-5931-5
167 págs. (Pdf descargable)



LA AMENAZA MÁS LETAL
NUESTRA GUERRA CONTRA LAS PANDEMIAS Y CÓMO EVITAR LA PRÓXIMA
Michael T. Osterholm
Planeta, 2020
ISBN: 978-84-08-23149-3
384 págs. (19,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

JULIO

1970

Sobre nervios y conducta

«Razonaba Darwin que, como el ser humano había evolucionado a partir de animales inferiores, nuestras conductas debían de tener sus paralelos en las de ellos. Las ideas radicales de Darwin estimularon los estudios sobre la conducta animal, lo que abrió el camino a una experimentación que no era factible con humanos. Los cangrejos de río, las sanguijuelas, diversos insectos y los caracoles poseen la gran ventaja de que su sistema nervioso se compone de relativamente pocas células nerviosas (quizá 10.000 o 100.000 frente al billón más menos de los animales superiores). En esos animales puede empezarse a trazar, en células individuales, no solo la información sensorial que recibe el sistema nervioso y las acciones motrices que el mismo ejecuta, sino la secuencia total de la actividad subyacente a la respuesta conductual. —Eric R. Kandel»

Kandel fue galardonado con el premio Nobel de fisiología o medicina de 2000.



1970



1920



1870

1920

El valor de un mineral

«Durante siglos, el amianto no fue sino una curiosidad, una mística paradoja mineral, en todos los aspectos una piedra sólida aunque formada por fibras como sedosas, de por sí tan robustas que millones años de enfriamientos, endurecimientos y agrietamientos de la Tierra no rompieron esas hebras. El casi inestimable valor económico del amianto procede del hecho de que posee una inigualable combinación de características y de resistencia al calor y al desgaste. La perfección de los aislamientos térmicos (y del frío) y su empleo en miles de centrales eléctricas estadounidenses ahorra energía y combustibles por valor de millones de dólares al año.»

Recuperar los bosques

«Al fin los estadounidenses hemos cobrado plena conciencia de la gravedad de la amenaza a nuestra riqueza forestal. Durante decenios hemos estado talando nuestros bosques sin pensar casi en la reforestación; en los últimos diez años, un sinnúmero de revistas y diarios han estado demandando toneladas y toneladas de papel cada semana, lo cual supone la tala de centenares de hectáreas de espléndidos árboles. Con el comienzo de la Gran Guerra se talaron más bosques para construir grandes cuarteles, barcos y otras obras. Y ahora nos encontramos con unos bosques seriamente mermados. Es hora de rectificar y restaurar, pues la madera es algo sin lo cual apenas prosperaremos.»

1870

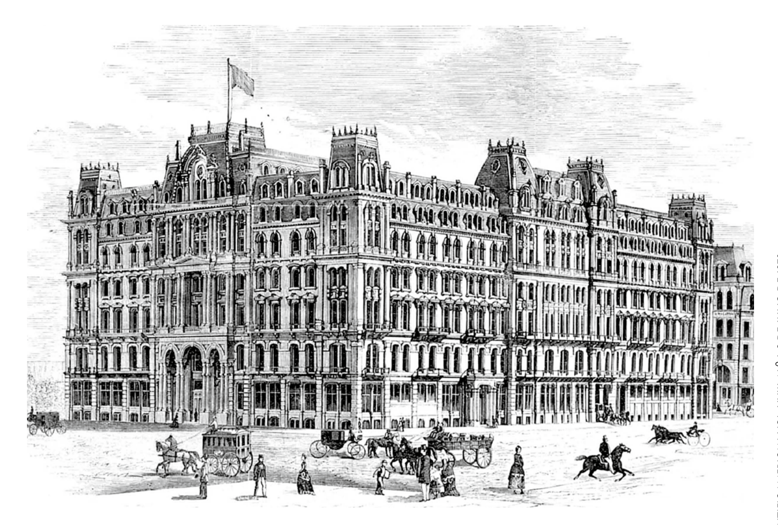
El debate sobre Darwin

«El abate Moigno es una autoridad científica y a la vez un católico de ortodoxia incuestionable, lo cual no deja de añadir trascendencia a las siguientes notas que publicó en *Les Mondes*: "En vista de la hostilidad surgida en algunos círculos contra la investigación científica como propicia al descreimiento, son de interés las manifestaciones de quien confiesa una fe tan conservadora. Los principios, sobre los que pueden sentirse seguros los científicos cristianos, fueron admirablemente expuestos por el profesor Dana en su reciente conferencia, en la cual abordó la cuestión de la teoría de Darwin. En el curso de sus observaciones afirmó que creer en una teoría de la evolución no es ateísmo, que los hechos científicos revelan claramente un cierto esquema evolucionista, y que el libro de Darwin fue una obra de gran mérito. Que nadie tema a la investigación científica."»

El gran hotel de Chicago

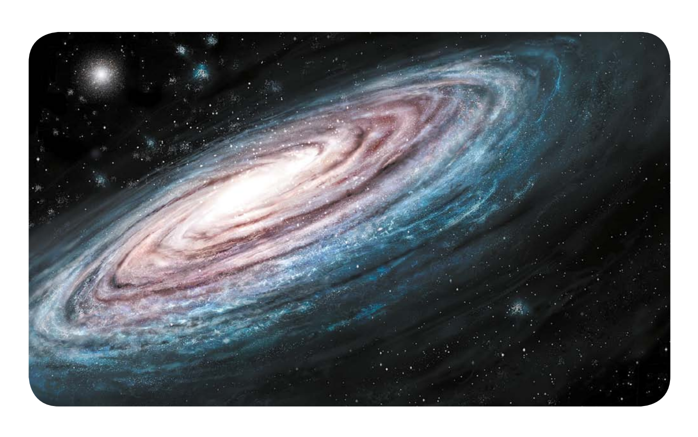
«La Compañía de Hoteles del Pacífico está a punto de erigir, en Chicago, el magnífico edificio del que aquí ofrecemos un grabado. El coste del edificio es de un millón de dólares, y cuando esté terminado será uno de los hoteles más grandes y completos del continente. [...] Chicago ha sido durante mucho tiempo favorecida con buenos hoteles, pero esta empresa promete, cuando se inaugure el hotel en 1872, una posición en la primera fila. El arquitecto de la estructura, William W. Boyington, de Chicago, ha logrado con su contribución a la obra un mérito profesional muy notable.»

La construcción del hotel acabó en 1873, pero en 1895 las exigencias de una ciudad en rápido crecimiento habían eclipsado la necesidad de este edificio antaño impresionante, y buena parte de él fue derribado.



EL HOTEL GRAND PACIFIC de Chicago, según un bosquejo de 1870.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XXIII, N.º 1, 2 DE JULIO DE 1870



ASTRONOMÍA

Una nueva visión de la Vía Láctea

Mark J. Reid y Xing-Wu Zheng

Una iniciativa para cartografiar la estructura espiral de la galaxia nos brinda una visión sin precedentes de nuestro hogar cósmico.

EVOLUCIÓN

El inesperado origen de los dedos

John A. Long y Richard Cloutier

Un fósil singular revela que los dedos de la mano surgieron antes de que los vertebrados abandonasen el agua para colonizar la tierra firme.

CAMBIO CLIMÁTICO

Cómo fijar un precio a la contaminación por carbono

Gilbert E. Metcalf

Una combinación inteligente de modelos matemáticos y selección de políticas permite determinar un impuesto viable para atajar las emisiones de CO_2.



SOSTENIBILIDAD

Vivir con el bosque

Jerome Lewis

Los pigmeos de la cuenca del Congo llevaban una vida próspera, hasta que el desarrollo y los conservacionistas llegaron de la mano.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado
PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN
Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES
Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes, Una nueva era para el alzhéimer, El nexo entre la menopausia y el alzhéimer* y *La influencia de la polución en la demencia*; José Óscar Hernández Sendín: *Apuntes*; Ernesto Lozano: *Los resultados anómalos se acumulan en el LHC*; Fabio Teixidó: *¿Cómo se han reducido las emisiones de carbono por la pandemia de COVID-19?* y *Reinterpretar un volcán*; Ana Mozo: *Las bases neurobiológicas del alzhéimer*; Alfredo Marcos: *Cómo trascender la vida natural*; Lorenzo Gallego: *Necesitamos una ciencia de la noche*; Gonzalo Claros: *Dentro del coronavirus*; Tomás Ortín: *En busca de agujeros blancos*; Miguel A. Vázquez Mozo: *Retrofuturismo cuántico*; Ramón Muñoz Tapia: *El láser ultravioleta de nitrógeno (I)*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova
17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España